

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO (UFES)**

**CENTRO TECNOLÓGICO**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
AMBIENTAL (PPGEA)**

**JUAN FELIPE MEDINA**

**AVALIAÇÃO DAS PARAMETRIZAÇÕES FÍSICAS DO MODELO  
WRF PARA A CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA PARA A REGIÃO  
METROPOLITANA DA GRANDE VITÓRIA**

**Vitória, 2017**

**JUAN FELIPE MEDINA**

**AVALIAÇÃO DAS PARAMETRIZAÇÕES FÍSICAS DO MODELO  
WRF PARA A CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA PARA A REGIÃO  
METROPOLITANA DA GRANDE VITÓRIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção de título de Mestre em Engenharia Ambiental, na área de concentração Poluição do Ar.

Orientadores: Profa. Dra. Jane Meri Santos  
Profa. Dra. Taciana Toledo de  
Almeida Albuquerque

Co-orientador: Prof. Dr. Neyval Costa Reis Jr.

Vitória

2017

## **DEDICATÓRIA**

A mi papá Jairo Iván Medina.  
A toda mi familia y amigos.

*"Cuando despertamos en la mañana tenemos dos alternativas, volvemos a dormir y a soñar, o nos despertamos y perseguimos nuestros sueños"*

Realidades- Carlos Manuel Oliva

## **AGRADECIMENTOS**

Quiero agradecer primero que todo a Dios por darme salud, fortaleza y valor para venir tras este sueño y permitirme crecer inmensamente como profesional y persona. A mi viejo que siempre estuvo pendiente de mí desde Colombia, siempre deseándome lo mejor y dándome ánimo en los momentos que lo necesité. Sos mi ejemplo a seguir viejo, gracias por hacerme quien soy.

Agradecimientos especiales a familiares y amigos que, cada uno desde su perspectiva y campo, me ayudó a distraer la mente y a que jamás me sintiera sólo así estuviese a tantos kilómetros de distancia.

A mi parcerero Yossi que compartió un sinfín de historias, futbol, almuerzos, tintos, cervezas y hamburguesas en estos dos años. También mil gracias por haberme enseñado a usar el “F5”, hermano.

Gracias a Alexandre y Elson que son un par de buenos amigos que dejó la maestría aquí en Brasil.

Gracias a la UFES por haberme permitido estudiar y estar en sus instalaciones, al igual que permitirme llevarla para siempre en mi historia siendo master desta institución. A la OEA por haberme permitido ser partícipe de la beca que me trajo hasta aquí y a CAPES por ayudarme con el financiamiento para vivir aquí en Vitória.

Gracias a los profesores, tanto de la UFES como de la UdeM que me hicieron enamorar de este cuento y permitirme vivir del aire.

Infinitas gracias a todas las personas con las que compartí estos dos años aquí en Brasil, gracias por todas las experiencias con las que se aprendieron y se creció como persona. Siempre quedarán en mi historia.

Por último y no menos importante, quiero agradecer al RU por haberme alimentado por R\$1.50.

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo principal avaliar o desempenho das diferentes parametrizações físicas da Camada Limite Atmosférica (CLA) disponíveis no modelo meteorológico *Weather Research and Forecasting* (WRF) 3.6.1., com o fim de identificar qual delas representa melhor as condições meteorológicas da Região Metropolitana da Grande Vitória (RMGV) em dois meses pertencentes aos dois períodos estacionais mais representativos da região, inverno e verão. Para lograr dito objetivo, foram realizadas 34 simulações, onde 17 ocorreram no período de inverno (07/2010) e 17 para o período de verão (02/2010), com as quais foram avaliadas todas as parametrizações da CLA, excetuando a QNSE (*Quasi-normal Scale Elimination*) e as MYNN (*Mellor-Yamada Nakanishi Niino*) nível 2.5 e 3, com suas respectivas parametrizações da Camada Limite Superficial (CLS) disponíveis no modelo. Nestas simulações foram utilizados dois domínios aninhados onde o domínio maior tem uma resolução espacial de 5 km, formando um domínio de 5 x 5 km com 49 x 49 células que cobre todo o estado do Espírito Santo, parte do Minas Gerais, Rio de Janeiro e Bahia e o domínio menor tem uma resolução espacial de 1 km, formando um domínio de 1 x 1 km com 120 x 120 células que compreende toda a RMGV. Ambos domínios contam com uma estrutura vertical representada por 21 camadas verticais e encontram-se centrados nas coordenadas 20,25°S e 40,29°W.

Foram comparados, utilizando uma série de parâmetros estatísticos, os dados simulados pelo modelo WRF obtidos nas diferentes modelagens com as variáveis meteorológicas de temperatura superficial (2 m), velocidade e direção do vento (10 m) com os dados reais medidos pelas estações pertencentes a Rede Automática de Monitoramento da Qualidade do Ar (RAMQAr) e o aeroporto da RMGV. Os resultados mostraram que a parametrização que melhor representou os valores das variáveis meteorológicas anteriormente mencionadas para o período de verão foi a parametrização utilizada na modelagem M\_1 que corresponde aos esquemas YSU para a CLA e a MM5 melhorado para a CLS, sendo a estação Carapina a que apresenta valores simulados mais pertos aos valores reais observados. Por outro lado, para o período de inverno, a parametrização que melhor representou os valores das variáveis meteorológicas mencionadas foi a parametrização utilizada na modelagem M\_12 que corresponde aos esquemas UW para a CLA e a MM5 para a CLS, sendo Cariacica e aeroporto as estações que apresentaram uma acurácia maior entre os dados simulados e os dados reais medidos. Os resultados apresentados por ambas parametrizações mostram que os melhores resultados se apresentam para a velocidade do vento, seguida da temperatura superficial e

a direção do vento. Estes resultados sugerem a necessidade de testar as outras parametrizações físicas disponíveis no modelo com o fim de melhorar os resultados das predições das variáveis meteorológicas para a RMGV e assim posteriormente ter melhores resultados no momento de utilizar estes dados em modelos de dispersão.

Palavras chaves: WRF, Camada Limite Atmosférica, RMGV, parametrizações físicas.

## ABSTRACT

The main objective of this work is to evaluate the performance of the different PBL physical parameterizations available in the Weather Research and Forecasting model (WRF) 3.6.1., in order to identify which one best represents the meteorological conditions of the Metropolitan Region of Grande Vitória (RMGV) in the two most representative periods of the region, winter and summer. To achieve this goal, were made a total of 34 simulations, 12 for the winter period (07/2010) e 12 for the summer period (02/2016), with which all the PBL parameterizations were evaluated, except QNSE (Quasi-normal Scale Elimination) and the MYNN (Mellor-Yamada Nakanishi Niino) level 2.5 and 3, with their respective CLS parameterization available in the model. For these simulations, two nested domains were used where the major domain has a spatial resolution of 5 km, forming a 5 x 5 km domain with 49 x 49 cells covering the entire state of Espírito Santo, part of the Minas Gerais, Rio de Janeiro and Bahia and the smaller domain has a spatial resolution of 1 km, forming a 1 x 1 km domain with 120 x 120 cells comprising the entire RMGV. both with a vertical structure represented by 21 vertical layers and centered at the coordinates 20,25 ° S and 40,29 ° W.

In order to achieve the main goal, the model data obtained with each parameterization were compared with the data measured in the stations belonging to RMAQAR and the airport of surface temperature (2 m), wind and speed direction (10 m), using the statistical parameters mentioned in subsection 4.3 of this dissertation. The results showed that the parameterization that best represented the values of the meteorological variables previously mentioned for the summer period was the parameterization used in the modeling M\_1 that corresponds to the YSU schemes for CLA and the improved MM5 for the CLS, with the Carapina station presenting simulated values closer to the real values observed. On the other hand, for the winter period, the parameterization that best represented the values of the mentioned meteorological variables was the parameterization used in the modeling M\_12 that corresponds to the schemes UW for the CLA and the MM5 for the CLS, being Cariacica and airport the stations that presented an accuracy between the simulated data and the real data observed. The results presented by both parameterizations show that the best results are presented for wind speed, followed by surface temperature and wind direction. These results suggest the need to test the other physical parameterizations available in the model in order to improve the prediction results of the



meteorological variables for the RMGV and thus to have better results at the moment of using this data in dispersion models.

**Key words:** WRF, Planetary Boundary Layer, RMGV, physical parameterizations.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Evolução diária da CLA. Fonte: (Stull, 1988). .....	7
FIGURA 2: Níveis eta ( $\eta$ ) do ARW. Fonte: C. Skamarock, et al., 2008. ....	10
FIGURA 3: Processos físicos e suas interações no modelo WRF. Fonte: Adaptado de Dudhia (2012). ....	12
FIGURA 4: Processos físicos simulados pelas parametrizações de cumulus no modelo WRF. Fonte: Adaptado de Dudhia (2012). ....	14
FIGURA 5: Processos modelados pelo WRF e a sua distribuição ao longo do perfil vertical da atmosfera. Fonte: Adaptado de Dudhia (2012). ....	15
FIGURA 6: Hipótese de fechamento local e não local. Fonte: (COMET, 2016). ....	17
FIGURA 7: Representação da interação das camadas do modelo para: (I) o esquema original ACM e (II) o novo esquema ACM2. Fonte: (Pleim, 2006). ....	31
FIGURA 8: Grade utilizada pelo esquema físico da CLA “TEMF” do modelo WRF. Fonte: (Mauritsen, et al., 2007) .....	43
FIGURA 9: Interação entre as parametrizações físicas da superfície do modelo WRF e a sua influência na modelagem da CLA realizada pelo modelo. Fonte: Adaptado de Dudhia (2012). ....	54
FIGURA 10: Fluxos superficiais que tem em conta as parametrizações físicas da superfície terrestre no modelo WRF onde SH e LH são os fluxos de calor latente e sensível e LW e SW são os fluxos de radiação de onda longa e curta. Fonte: Adaptado de Dudhia (2012). ....	55
FIGURA 11: Processos radiativos presentes na atmosfera que têm em conta os esquemas de radiação no modelo meteorológico WRF. Fonte: Adaptado de Dudhia (2012). ....	56
FIGURA 12: Localização e divisão política da RMGV-ES, Brasil. Fonte: Adaptado de (Ferreira, 2014). ....	58
FIGURA 13: Modelo Digital de Elevação Espírito Santo. Fonte: (Instituto Jones dos Santos Neves, 2011) .....	59
FIGURA 14: Usos e ocupações da terra na RMGV 2010. Fonte: (Revista franco-brasileira de geografia, 2014) .....	60
FIGURA 15: Configuração dos domínios utilizados para as simulações no WRF. ....	61
FIGURA 16: Estações pertencentes a RAMQAr as quais medem dados meteorológicos. ....	65
FIGURA 17: Gráfico soccer goal MB vs RMSE da velocidade do vento (10 m) para as estações de monitoramento pertencentes a RAMQAr e o aeroporto: (a) Carapina, (b) Enseada do Suá, (c) Ibes, (d) Cariacica e (e) Aeroporto (02/2010) onde o polígono verde representa os critérios do Emery, et al.,	

(2001) e o polígono vermelho representa os critérios dos autores Borge et al. (2008), Reboredo et al. (2014) e Zhang et al. (2014).....	72
FIGURA 18: Gráfico soccer goal MB vs RMSE da direção do vento (10 m) para as estações de monitoramento pertencentes a RAMQAr e o aeroporto: (a) Carapina, (b) Enseada do Suá, (c) Ibes e (d) Aeroporto (02/2010) onde o polígono verde representa os critérios do Emery, et al., (2001) e o polígono vermelho representa os critérios dos autores Borge et al. (2008), Reboredo et al. (2014) e Zhang et al. (2014). ....	74
FIGURA 19: Gráfico soccer goal MB vs RMSE da velocidade superficial (2 m) para as estações de monitoramento pertencentes a RAMQAr e o aeroporto: (a) Carapina, (b) Cariacica e (c) Aeroporto (02/2010) onde o polígono verde representa os critérios do Emery, et al., (2001). ....	76
FIGURA 20: Gráfico soccer goal da: (a) Velocidade do vento (10 m), (b) direção do vento (10 m) e (c) temperatura superficial (2 m) para as estações de monitoramento pertencentes a RAMQAr e o aeroporto para a modelagem M_1 (esquema YSU para a CLA e MM5 melhorado para a CLS.) no período de verão (02/2010) onde o polígono verde representa os critérios do Emery, et al., (2001) e o polígono vermelho representa os critérios dos autores Borge et al. (2008), Reboredo et al. (2014) e Zhang et al. (2014). ....	80
FIGURA 21: Série temporal da velocidade do vento (10 m) para as estações de monitoramento pertencentes a RAMQAr e o aeroporto: (a) Carapina, (b) Enseada do Suá, (c) Ibes, (d) Cariacica e (e) Aeroporto para a modelagem M_1 (esquema YSU para a CLA e MM5 melhorado para a CLS.) no período de verão (02/2010) onde a linha de cor azul corresponde aos valores medidos nas diferentes estações e a linha vermelha corresponde aos valores simulados pelo modelo WRF. ....	82
FIGURA 22: Rosas do vento para a direção do vento (10 m) para as estações de monitoramento pertencentes a RAMQAr e o aeroporto: (a e b) Carapina, (c e d) Enseada do Suá (e e f) Ibes e (g e h) Aeroporto para a modelagem M_1 (esquema YSU para a CLA e MM5 melhorado para a CLS.) no período de verão (02/2010) onde a as rosas da esquerda (a, c, e e g) representam as rosas realizadas com os dados reais medidos e as rosas da direita (b, d, f e h) representam as rosas do vento realizadas com os dados simulados pelo modelo WRF para as diferentes estações. ....	85
FIGURA 23: Série temporal da temperatura superficial (2 m) para as estações de monitoramento pertencentes a RAMQAr e o aeroporto: (a) Carapina, (b) Cariacica e (c) Aeroporto para a modelagem M_1 (esquema YSU para a CLA e MM5 melhorado para a CLS.) no período de verão (02/2010) onde a linha de cor azul corresponde aos valores medidos nas diferentes estações e a linha vermelha corresponde aos valores simulados pelo modelo WRF. ....	87
FIGURA 24: Gráfico soccer goal MB vs RMSE da velocidade do vento (10 m) para as estações de monitoramento pertencentes a RAMQAr e o aeroporto: (a) Carapina, (b) Enseada do Suá, (c) Ibes, (d)	

Carapina e (e) Aeroporto (07/2010) onde o polígono verde representa os critérios do Emery, et al., (2001) e o polígono vermelho representa os critérios dos autores Borge et al. (2008), Reboredo et al. (2014) e Zhang et al. (2014).....	89
FIGURA 25: Gráfico soccer goal MB vs RMSE da direção do vento (10 m) para as estações de monitoramento pertencentes a RAMQAr e o aeroporto: (a) Carapina, (b) Enseada do Suá, (c) Ibes e (d) Aeroporto (07/2010) onde o polígono verde representa os critérios do Emery, et al., (2001) e o polígono vermelho representa os critérios dos autores Borge et al. (2008), Reboredo et al. (2014) e Zhang et al. (2014). ....	91
FIGURA 26: Gráfico soccer goal MB vs RMSE da velocidade superficial (2 m) para as estações de monitoramento pertencentes a RAMQAr e o aeroporto: (a) Carapina, (b) Carapina e (c) Aeroporto (07/2010) onde o polígono verde representa os critérios do Emery, et al., (2001). ....	93
FIGURA 27: Gráfico soccer goal da: (a) Velocidade do vento (10 m), (b) direção do vento (10 m) e (c) temperatura superficial (2 m) para as estações de monitoramento pertencentes a RAMQAr e o aeroporto para a modelagem M_12 (esquema UW para a CLA e MM5 para a CLS.) no período de inverno (07/2010) onde o polígono verde representa os critérios do Emery, et al., (2001) e o polígono vermelho representa os critérios dos autores Borge et al. (2008), Reboredo et al. (2014) e Zhang et al. (2014). ....	97
FIGURA 28: Série temporal da velocidade do vento (10 m) para as estações de monitoramento pertencentes a RAMQAr e o aeroporto: (a) Carapina, (b) Enseada do Suá, (c) Ibes, (d) Cariacica e (e) Aeroporto para a modelagem M_12 (esquema UW para a CLA e MM5 para a CLS.) no período de inverno (07/2010) onde a linha de cor azul corresponde aos valores medidos nas diferentes estações e a linha vermelha corresponde aos valores simulados pelo modelo WRF. ....	99
FIGURA 29: Rosas do vento para a direção do vento (10 m) para as estações de monitoramento pertencentes a RAMQAr e o aeroporto: (a e b) Carapina, (c e d) Enseada do Suá (e e f) Ibes e (g e h) Aeroporto para a modelagem M_12 (esquema UW para a CLA e MM5 para a CLS.) no período de inverno (07/2010) onde a as rosas da esquerda (a, c, e e g) representam as rosas realizadas com os dados reais medidos e as rosas da direita (b, d, f e h) representam as rosas do vento realizadas com os dados simulados pelo modelo WRF para as diferentes estações. ....	102
FIGURA 30: Série temporal da temperatura superficial (2 m) para as estações de monitoramento pertencentes a RAMQAr e o aeroporto: (a) Carapina, (b) Cariacica e (c) Aeroporto para a modelagem M_12 (esquema UW para a CLA e MM5 para a CLS.) no período de inverno (07/2010) onde a linha de cor azul corresponde aos valores medidos nas diferentes estações e a linha vermelha corresponde aos valores simulados pelo modelo WRF. ....	104

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1: Dependência entre parametrizações da CLA e da CLS.....	13
TABELA 2: Resumo das parametrizações empregadas nas modelagens realizadas com o WRF 3.6.1 .....	63
TABELA 3: Parâmetros meteorológicos monitorados pelas estações pertencentes a RAMQAr e o aeroporto. Fonte: IEMA., 2014. ....	64
TABELA 4: Valores dos indicadores estatísticos propostos pelo Emery, et al., 2001 para as variáveis meteorológicas avaliadas. Fonte: (Emery, et al., 2001) .....	66
TABELA 5: Valores do coeficiente de Pearson. Fonte: (Nieves Hurtado & Domínguez Sánchez, 2010). ....	68
TABELA 7: Resumo dos valores estatísticos para a modelagem M_1 (esquema YSU para a CLA e MM5 melhorado para a CLS.) para cada estação pertencente a RMAQAr e o aeroporto para o período de verão (02/2010). ....	78
TABELA 8: Resumo dos valores estatísticos para a modelagem M_12 (esquema UW para a CLA e MM5 para a CLS.) para cada estação pertencente a RMAQAr e o aeroporto para o período de inverno (07/2010). ....	95
TABELA 9: Resumo dos resultados dos testes estatísticos para a estação Carapina (02/2010). ....	120
TABELA 10: Resumo dos resultados dos testes estatísticos para a estação Enseada do Suá (02/2010). ....	122
TABELA 11: Resumo dos resultados dos testes estatísticos para a estação Ibes (02/2010). ....	123
TABELA 12: Resumo dos resultados dos testes estatísticos para a estação Cariacica (02/2010). .	124
TABELA 13: Resumo dos resultados dos testes estatísticos para a estação aeroporto (02/2010). .	126
TABELA 14: Resumo dos resultados dos testes estatísticos para a estação Carapina (07/2010)...	128
TABELA 15: Resumo dos resultados dos testes estatísticos para a estação Enseada do Suá (07/2010). ....	130
TABELA 16: Resumo dos resultados dos testes estatísticos para a estação Ibes (07/2010). ....	131
TABELA 17: Resumo dos resultados dos testes estatísticos para a estação Cariacica (07/2010). .	132
TABELA 18: Resumo dos resultados dos testes estatísticos para a estação aeroporto (07/2010). .	134

## LISTA DE SIGLAS

ARW	Advanced Research WRF
CLA	Camada Limite Atmosférica/Camada Limite Planetária
CLC	Camada Limite Convectiva
CLS	Camada Limite Superficial
DEM	Modelo de elevação digital
IEMA	Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos
IOA	Índice de ajuste
LIDAR	Light Detection and Ranging
MM5	<i>Fifth-Generation NCAR/Penn State Mesoscale Model</i>
NCAR	<i>National Center for Atmospheric Research</i>
NCEP	<i>National Centers for Environmental Prediction</i>
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
OMS/WMO	Organização Meteorológica Mundial ( <i>World Meteorological Organization</i> )
RMGV	Região Metropolitana da Grande Vitória
RMSE	Erro quadrático médio normalizado
TKE	Energia Cinética Turbulenta
USEPA	Agência Norte Americana de Proteção Ambiental ( <i>United States Environmental Protection Agency</i> )
USGS	<i>U.S Geological Suvery</i>
WPS	WRF Preprocessing System
WRF	<i>Weather Research and Forecast model</i>

# SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVOS .....	3
2.1. Objetivo geral .....	3
2.2. Objetivos específicos.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1. Trabalhos correlatos.....	4
3.2. CONCEITOS TEÓRICOS.....	5
3.2.1. Camada Limite Atmosférica .....	5
3.2.2. Modelo meteorológico WRF .....	8
4. METODOLOGIA.....	56
4.1. Região de estudo.....	57
4.2. Modelagem meteorológica com o modelo WRF 3.6.1 .....	61
4.2.1. Parametrizações utilizadas nas modelagens.....	62
4.3. Análise e avaliação de desempenho dos dados modelados pelo WRF.....	64
5. RESULTADOS .....	70
5.1. Verão .....	71
5.2. Inverno .....	88
6. CONCLUSÕES.....	106
7. RECOMENDAÇÕES.....	109
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	110
APÊNDICE A: Valores dos indicadores estatísticos para cada estação de monitoramento pertence a RAMQAR e o aeroporto .....	120

## 1. INTRODUÇÃO

O aumento da poluição atmosférica devido à instalação de indústrias próximas das grandes cidades e ao aumento da quantidade de automóveis circulando nos centros urbanos é um grande problema ambiental em nossos dias, afetando diretamente a saúde da população, especialmente crianças e idosos, além da fauna, flora e materiais. A crescente preocupação com o meio ambiente e a saúde humana acarretou um aumento significativo no interesse científico por assuntos relacionados às áreas de meteorologia e qualidade do ar. Esta poluição que pode ser originada tanto de atividades antropogênicas como de processos naturais, e se apresenta em forma de gás, líquido ou sólido, podendo ser assimilada pelo ambiente no ar, a terra e corpos de água do planeta inteiro (E. Roberts Alley & Associates, Inc., 2000).

A atmosfera terrestre pode ser estratificada em quatro grandes camadas, em função da variação da temperatura com a altura, porém, para efeito de estudos da poluição atmosférica, a camada mais próxima ao solo é a que tem maior interesse, já que é nela onde ocorrem a quase totalidade dos lançamentos e dispersão de poluentes. A poluição atmosférica é gerada e assimilada em uma porção da troposfera chamada de Camada Limite Atmosférica (CLA) que é uma região diretamente influenciada pelas trocas de momentum, massa, calor e vapor d'água que ocorrem entre a superfície terrestre e a atmosfera. Estas trocas são induzidas por forçantes como o atrito com a superfície, a evaporação, a transpiração, a transferência de calor (condução, convecção e radiação), a emissão de poluentes e as modificações no escoamento que são induzidas pela topografia (Kaimal & Finnigan, 1994).

Tornando-se este um assunto de interesse global devido a que o ar pode distribuir a poluição sobre grandes áreas geográficas, o ser humano, com o fim de compreender os processos de transporte dos poluentes na CLA, realiza uma série de observações de parâmetros (velocidade e direção do vento, temperatura, etc.) com equipamentos especializados (SODAR e LIDAR). Porém, apenas medidas ambientais não são suficientes para descrever todos os processos físicos que ocorrem dentro desta camada (Santiago, 2009).



Devido ao avanço da computação e suas múltiplas aplicações, a modelagem numérica tornou-se um instrumento científico muito importante. Atualmente tem-se desenvolvido ferramentas numéricas, que graças a sua capacidade de representar a realidade de uma maneira mais precisa, apresentam uma alta relevância no campo da meteorologia e climatologia permitindo simular e estimar o comportamento e transporte dos poluentes na CLA e assim avaliar futuros impactos ambientais gerados, por exemplo, por novas fontes de emissão na área de interesse (Santiago, 2009).

Um exemplo das ferramentas em numéricas desenvolvidas é o Weather Research and Forecasting (WRF) que é um sistema de modelagem numérica da atmosfera de domínio público amplamente utilizado para descrever fenômenos meteorológicos de mesoescala. Dentre suas aplicações estão previsões numéricas do tempo, aplicações na previsão da qualidade do ar, acoplamento com modelos de previsões oceânicas e de dispersão de poluentes atmosféricos (Santiago, 2015). Este sistema de modelagem numérica apresenta categorias físicas que ajudam a representar melhor os fenômenos simulados, descrevendo os complexos processos que ocorrem na atmosfera com uma série de opções físicas que dividem-se em: (I) microfísica, (II) parametrização de cumulus, (III) CLA, (IV) modelos de superfície terrestre (land-surface model) e (V) radiação (C. Skamarock, et al., 2008).

Devido à importância da CLA para a dispersão dos poluentes o principal objeto de estudo desta dissertação é testar as diferentes opções da física da CLA disponíveis no modelo WRF 3.6.1 com o fim de identificar a parametrização física que melhor representa os processos que ocorrem na CLA nos períodos de verão e inverno, considerando as características locais da RMGV (topografia acidentada e influência marinha), comparando os resultados das variáveis meteorológicas simuladas com os dados medidos pelas estações pertencentes a Rede de Monitoramento da Qualidade do Ar da Grande Vitória (RAMQAr) e o aeroporto.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo geral**

O objetivo principal desta dissertação consiste em avaliar o desempenho das diferentes parametrizações físicas para a simulação da Camada Limite Atmosférica (CLA) disponíveis no modelo WRF 3.6.1 na simulação das condições meteorológicas de uma região costeira tropical com relevo levemente complexo como a RMGV.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Investigar e avaliar a influência das diferentes parametrizações físicas da CLA do WRF na previsão de variáveis meteorológicas como temperatura, velocidade e direção do vento na RMGV;
- Identificar qual parametrização do modelo WRF representa melhor as condições meteorológicas, determinando se existe ou não uma sazonalidade, através de testes estatísticos aplicados entre dados reais medidos nas diferentes estações e os dados simulados.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo consta de duas seções, a primeira seção (3.1) apresenta uma breve descrição de trabalhos realizados anteriormente, tanto na RMGV como em outras áreas de interesse, onde avaliam diferentes esquemas da CLA do modelo WRF e na segunda seção (3.2) são apresentados os conceitos teóricos mais relevantes relacionados ao tema principal desta dissertação.

#### 3.1. Trabalhos correlatos

O modelo meteorológico *Weather Research and Forecasting* (WRF) apresenta uma série de parametrizações físicas as quais estão vinculadas principalmente ao tratamento da radiação solar incidente (onda curta) e terrestre (onda longa), a convecção dos cumulus, características da superfície e os fluxos turbulentos atmosféricos na CLA. Devido à relevância desta camada e sua relação direta com os processos de dispersão da poluição atmosférica, existem trabalhos e pesquisas desenvolvidas que testam diferentes parametrizações da CLA, com as quais conta o modelo WRF com o fim de tentar representar melhor as características meteorológicas reais da área de interesse. Nesta seção serão apresentadas algumas destas pesquisas que foram relevantes para o desenvolvimento desta pesquisa.

Correia de Marchi et al. (2009) realizaram uma avaliação de 3 parametrizações da CLA do WRF (MYJ, YSU e BouLac) com o objetivo de avaliar os campos de vento para três regiões litorâneas do Estado de Alagoas: Maceió (litorâneo central), Coruripe (litorâneo sul) e São Luís do Quitunde (Litorâneo norte) entre os dias 08 e 11 de maio de 2009. Os resultados mostraram que o esquema da CLA que apresentou melhores aproximações para simular a estrutura da mesma na região litorânea de Alagoas foi a parametrização local BouLac.

Salvador (2014) testou três diferentes parametrizações da CLA do WRF [dois de fechamento não local (YSU e ACM2) e um de fechamento local (MYJ)] e dois esquemas de camada superficial do solo [(RUC e Noah)] para avaliar a evolução diária da CLA e a formação de brisas marítimas nas regiões de Dunkerque (França) e a RMGV (Brasil) nos dias 07 e 08 de setembro de 2010. Os resultados mostraram que a estimativa que modelou de uma maneira mais precisa a altura da CLA em Dunkerque foi a obtida pelas parametrizações Mellor–Yamada–Janjic (MYJ) (para a CLA) e

Noah [Camada Limite Superficial (CLS)] e para a RMGV as parametrizações Yonsei University (YSU) (para a CLA) e Noah (para a CLS). Tudo isto comparando os valores modelados com os valores medidos pelo LIDAR e SODAR em campanhas de medição em ambas regiões de estudo.

Cohen et al. (2015) testaram duas parametrizações locais (MYJ e QNSE), duas não locais (YSU e MRF) e uma híbrida (ACM2) da CLA no modelo WRF para modelar cenários meteorológicos severos como tornados em períodos gelados nos Estados Unidos (dezembro de 2010 e janeiro de 2012). Neste artigo mencionam as vantagens e desvantagens de cada esquema utilizado e neste concluem que os esquemas não locais utilizados representam melhor o crescimento diurno da CLA e os eventos meteorológicos severos que os esquemas locais utilizados.

Branks et al. (2016) fizeram várias modelagens no verão (julho) de 2014 na cidade de Atenas na Grécia testando 8 diferentes parametrizações da CLA no WRF versão 3.4, 5 locais (MYJ, QNSE, MYNN2, BouLac e UW) e 3 não locais (YSU, ACM2 e TEMF) com diferentes parametrizações da CLS (MM5, Eta, QNSE, MYNN e TEMF), as quais foram comparadas com os valores das variáveis meteorológicas medidas (velocidade do vento e umidade a 10 m e temperatura a 2 m) pelas 14 estações meteorológicas na área de estudo e as alturas da CLA modeladas com dados medidos por LIDAR. A conclusão do artigo é que as parametrizações da CLA não locais (TEMF e ACM2) apresentam os valores modelados mais perto dos dados reais medidos.

## **3.2. Conceitos Teóricos**

### **3.2.1. Camada Limite Atmosférica**

A CLA é a região da troposfera que está diretamente influenciada pela presença da superfície terrestre devido à troca vertical de quantidade de movimento, calor e umidade que responde aos forçamentos superficiais em escala de tempo de uma hora ou menos e a sua importância deve-se ao fato de que a grande maioria das atividades antropogênicas originam-se e geram consequências dentro desta. Nela ocorrem os processos turbulentos responsáveis da dispersão e transporte dos contaminantes atmosféricos, podendo variar sua altura segundo a intensidade da radiação solar incidente, a latitude, ocupação do solo, topográfica do lugar, vegetação, entre outras variáveis (Stull, 1988).

Quando os raios solares atingem a superfície terrestre, o solo e os corpos d'água são aquecidos e transferem parte da energia térmica para as suas camadas internas, assim como para as camadas de ar próximas modificando sua temperatura e assim sua densidade, gerando assim correntes ascendentes de ar. Estes deslocamentos são complexos já que sofrem a influência da viscosidade do ar, o atrito com o solo e a interação com outros fenômenos de mesoescala como as brisas, os ventos anabáticos, catabáticos, etc. Estes fenômenos inserem tensões nos vórtices maiores fazendo com que se desdobrem em vórtices menores até atingirem dimensões milimétricas onde as forças viscosas do atrito conseguem transformar em calor a energia cinética contida neles, processo conhecido como cascata de energia de Kolmogorov (Salvador, 2014).

A CLA apresenta um perfil turbulento e sua estrutura muda ao longo do dia onde são percebidas 3 grandes componentes desta estrutura (Stull, 1988) [FIGURA 1]:

- **Camada limite convectiva ou camada de mistura:** Nesta camada a turbulência comporta-se geralmente de maneira convectiva devido ao aquecimento na superfície que faz ascender o ar da superfície e o resfriamento do ar no topo da camada das nuvens que cria termas descendentes de ar frio. Ambos podem ocorrer simultaneamente ou separado, mesmo quando os movimentos convectivos dominam, ocorre um cisalhamento do vento devido a presença da superfície que contribui na geração de turbulência atmosférica. Dias onde não tem presença de nuvens, o desenvolvimento da camada de mistura está associada ao aquecimento solar.

A zona de entranhamento que se localiza acima desta camada de mistura funciona como uma barreira para as termas convectivas e causa o encerramento do domínio da turbulência.

- **Camada residual:** Aproximadamente meia hora antes do pôr do sol quando a formação das termas cessa e a turbulência decai, a camada de ar resultante é chamada camada residual devido a que suas variáveis de estado medias e as variáveis de concentração são as mesmas que as da camada de mistura que vai decaindo. Esta camada não tem contanto direito com a superfície e cresce junto com a camada estável; é por esta razão que esta camada residual não é afetada pelos transportes turbulentos que se originam na superfície (Stull, 1988). Na ausência de advecção nesta camada, ao ser liberados contaminantes nela, estes tendem a continuar uma dispersão homogênea tanto na direção vertical como na direção horizontal; isto porque a turbulência nesta camada é neutra, o que se traduz em intensidades iguais em todas as direções.

- **Camada estável:** Esta camada se dá graças a que no período noturno uma porção da camada residual entra em contato com a superfície e é caracterizada por sua turbulência fraca e esporádica. Os poluentes emitidos nesta camada tem pouca dispersão vertical então eles tendem-se a dissipar na horizontal com presença de alguns meandros. Esta camada pode ocorrer também durante o período de insolação em situações que a superfície esteja menos aquecida ou com menor temperatura do que o ar adjacente.

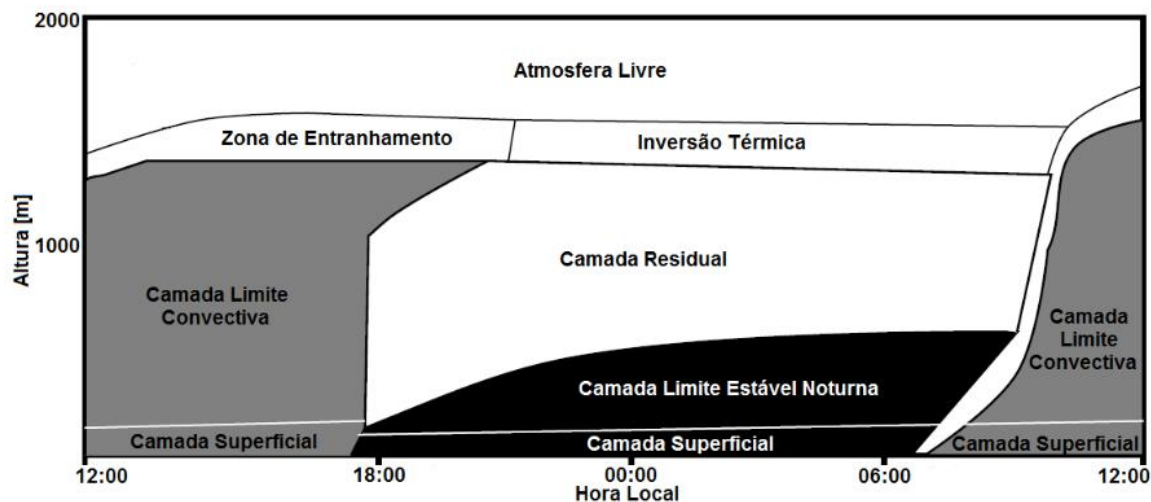


FIGURA 1: Evolução diária da CLA. Fonte: (Stull, 1988).

Além dos três maiores componentes da CLA mencionados anteriormente, a camada superficial, a zona de entranhamento e a camada de inversão térmica são componentes que também tem que ver com a dinâmica desta camada e são definidas a continuação:

- **Camada superficial:** A camada superficial é a parte mais baixa da CLA onde existe a troca de energia, vapor d'água e de momentum entre a superfície terrestre e a atmosfera responsável pelas características dinâmicas e termodinâmicas do escoamento. Durante o dia estas propriedades físicas se transportam por convecção e pela noite por condução com a camada de contato (camada de centímetros de profundidade que está em contato direto com a superfície terrestre e transfere calor e umidade verticalmente por condução e processos moleculares). O mais importante efeito da interação entre a superfície terrestre e a atmosfera é a geração de movimentos turbulentos desenvolvidos em várias escalas no tempo e no espaço (Magnago, et al., 2010).

- **Zona de entranhamento:** A zona de entranhamento é uma camada que se encontra na parte superior da CLC onde ocorre a transição entre as condições médias da CLA e a CLC e as condições laminais na atmosfera livre. O ar é arrastado tanto pelo aumento da profundidade da CLA quanto pelo ar que se movimenta para dentro da CLA (American Meteorological Society, 2012).
- **Inversão térmica:** A camada de inversão é uma camada estaticamente estável de ar relativamente cálido na parte superior da CLA. As parcelas de ar que elevam-se até esta camada voltam-se mais frias que o ar circundante o que inibe sua capacidade de se elevar mais. Esta inversão captura a turbulência induzida pela superfície e os poluentes sob ela (NOAA, s.d.).

Sobre a CLA está a atmosfera livre onde os efeitos de fricção aerodinâmica, aquecimento e resfriamento da superfície terrestre são pouco relevantes, predominando um escoamento laminar (Wallace, J. M. & Hobbs, P. V., 2006).

### 3.2.2. Modelo meteorológico WRF

O WRF é um sistema de modelagem numérica da atmosfera de domínio público que foi desenvolvido em um esforço colaborativo entre vários centros de pesquisa e agências governamentais dos Estados Unidos. Entre suas aplicações incluem previsões em numéricas do tempo, aplicações na previsão da qualidade do ar, acoplamento com modelos de previsões oceânicas e de dispersão de poluentes atmosféricos (Santiago, 2015). O software é bastante utilizado para uma ampla gama de aplicações em escalas que vão desde baixas escalas até escalas globais (C. Skamarock, et al., 2008).

A primeira versão do WRF foi lançada em dezembro de 2001 e seu código vem sendo melhorado ao longo dos anos. A versão que será utilizada neste estudo será a 3.6.1 a qual foi lançada em agosto de 2014 (Santiago, 2015).

O modelo WRF apresenta três módulos principais os quais são: o (I) pré-processamento (WPS), (II) o módulo de processamento (ARW) e o (III) pós-processamento.

No módulo de pré-processamento (WPS) os dados são processados e preparados para alimentar o módulo principal do WRF os dados necessários para a inicialização do modelo (dados

meteorológicos, geográficos e de ocupação de solo), de malhas horizontais e verticais, de aninhamentos, tempos, etc. Este módulo principal recebe os dados anteriormente preparados e mediante o uso das equações de conservação e parametrizações, realiza o processamento e envia o resultado para o módulo de pós-processamento. Este último módulo fornece um conjunto de valores espaço-temporais de grandezas escalares e vetoriais como pressões, umidades, temperaturas, velocidades, altura da CLA, etc. O modelo WRF permite realizar a assimilação de dados de observação ou de outros modelos graças ao módulo WRF-Var. Os dados de saída deste estão no formato NetCdf e podem ser lidos por vários programas gráficos como por exemplo o GrADS, Vis5D, IDV, entre outros (Santiago, 2015).

O núcleo dinâmico do WRF, o *Advanced Research WRF* (ARW), é o encarregado de realizar o processamento efetivo de dados e de resolver as equações não hidrostáticas e compressíveis de Euler, conservação de massa e energia. Estas equações são expressas na forma de fluxo usando variáveis que possuem propriedades conservativas e são escritas utilizando as coordenadas verticais denotada como  $\eta$  que acompanham o relevo proposta por Laprise em 1992 e é definida como (C. Skamarock, et al., 2008):

$$\eta = \frac{(P_h - P_{ht})}{P_{hs} - P_{ht}} \quad \text{EQ 1}$$

Em EQ 1  $P_h$  é a componente hidrostática da pressão,  $p_{hs}$  e  $p_{ht}$  são os valores da pressão ao longo da superfície e no topo da camada respectivamente. Seus valores variam entre zero (0) (no topo do modelo) e um na superfície [FIGURA 2] e esta coordenada vertical é chamada coordenada vertical de massa (C. Skamarock, et al., 2008).



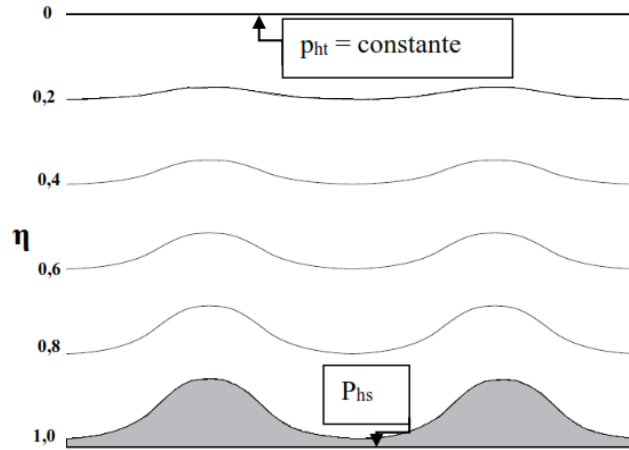


FIGURA 2: Níveis eta ( $\eta$ ) do ARW. Fonte: C. Skamarock, et al., 2008.

Todos os cálculos realizados pelo WRF para tentar simular os fenômenos que se apresentam na atmosfera são baseados no conjunto de equações que ainda não tem solução analítica pelo qual se fazem uma série de considerações para dar uma solução aproximada. Estas equações são as seguintes:

- Conservação da quantidade de movimento

$$\partial_t U + (\nabla \cdot V_U) - \partial_x(p\Phi_\eta) + \partial_\eta(p\Phi_x) = F_{sgs}^U + F_{diff6}^U + F_{rayl}^U \quad \text{EQ 2}$$

$$\partial_t V + (\nabla \cdot V_V) - \partial_y(p\Phi_\eta) + \partial_\eta(p\Phi_y) = F_{sgs}^V + F_{diff6}^V + F_{rayl}^V \quad \text{EQ 3}$$

$$\partial_t W + (\nabla \cdot V_W) - g(\partial_\eta p - \mu) = F_{sgs}^W + F_{diff6}^W + F_{rayl}^W \quad \text{EQ 4}$$

- Conservação da energia termodinâmica

$$\partial_t \theta + (\nabla \cdot V_\theta) = F_{rad}^\theta + F_{sgs}^\theta + F_{diff6}^\theta + F_{rayl}^\theta \quad \text{EQ 5}$$

- Conservação de massa

$$\partial_t \mu + (\nabla \cdot V) = 0 \quad \text{EQ 6}$$

- Equação geopotencial

$$\partial_t \Phi + \mu^{-1}[(\nabla \cdot V \Phi) - gW] = 0 \quad \text{EQ 7}$$

➤ Prognóstico do inverso da densidade

$$\partial_\eta \Phi = \alpha \mu \quad \text{EQ 8}$$

➤ Equação do estado termodinâmico

$$p = p_0 (R_d \theta) / (p_0 \alpha)^\gamma \quad \text{EQ 9}$$

Onde  $V$  é as três componentes do vector vento ( $u, v, w$ ),  $\theta$  é a temperatura potencial,  $\phi = gz$  é o geopotencial,  $p$  é pressão,  $\alpha = 1/\rho$  é o inverso da densidade,  $\gamma = C_p/C_v \approx 1,4$  é a razão das capacidades caloríficas para o ar seco,  $R_d$  é a constante do gás para ar seco,  $p_0$  é a pressão de referência (tipicamente  $10^5$  Pascal),  $V = \mu v = (U, V, W)$ ,  $\Theta = \mu \theta$  e os termos  $F_U$ ,  $F_V$ ,  $F_W$  e  $F_\theta$  representam os termos forçantes para várias parametrizações para  $U$ ,  $V$ ,  $W$  e  $\theta$  respectivamente (C. Skamarock, et al., 2008). Estes são o resultado da parametrização da radiação (subscrito *rad*), o esquema de turbulência sub-grade (*sgs*) cujos componentes horizontal e vertical são calculados individualmente no modelo; o esquema de difusão de sexta ordem (*diff6*) e o amortecimento Rayleigh (*rayl*) (Lehner, 2012)

Um dos fatores empregados pelo modelo WRF e que é importante para as simulações é o uso de parametrizações adequadas para representar os processos físicos na atmosfera. Estes fatores influenciam na dinâmica da atmosfera e iniciam-se nas transformações que ocorrem na superfície terrestre (tensões geradas pelas irregularidades superficiais, fluxos de calor e umidade, etc.) e as transformações físicas no núcleo da atmosfera como por exemplo o transporte da umidade, precipitação, etc. Esta série de parametrizações tem o objetivo de traduzir matematicamente estes processos físicos (Santiago, 2015).

As opções da física da atmosfera do modelo WRF dividem-se em várias categorias, cada uma contendo várias opções. Estas categorias são: (I) microfísica (microphysics), (II) parametrizações de cumulus (cumulus parameterization), (III) CLA (planetary boundary layer), (IV) modelo da

superfície terrestre (land-surface model) e (V) radiação (radiation); os quais estão relacionadas (FIGURA 3) e a alteração em uma destas interfere de alguma maneira nas demais. Estes métodos aplicam forçamentos extras às equações do modelo e isto implica matrizes com requerimentos físicos como a temperatura, pressão, alturas, espessura de capa, entre outras variáveis de estado (C. Skamarock, et al., 2008).

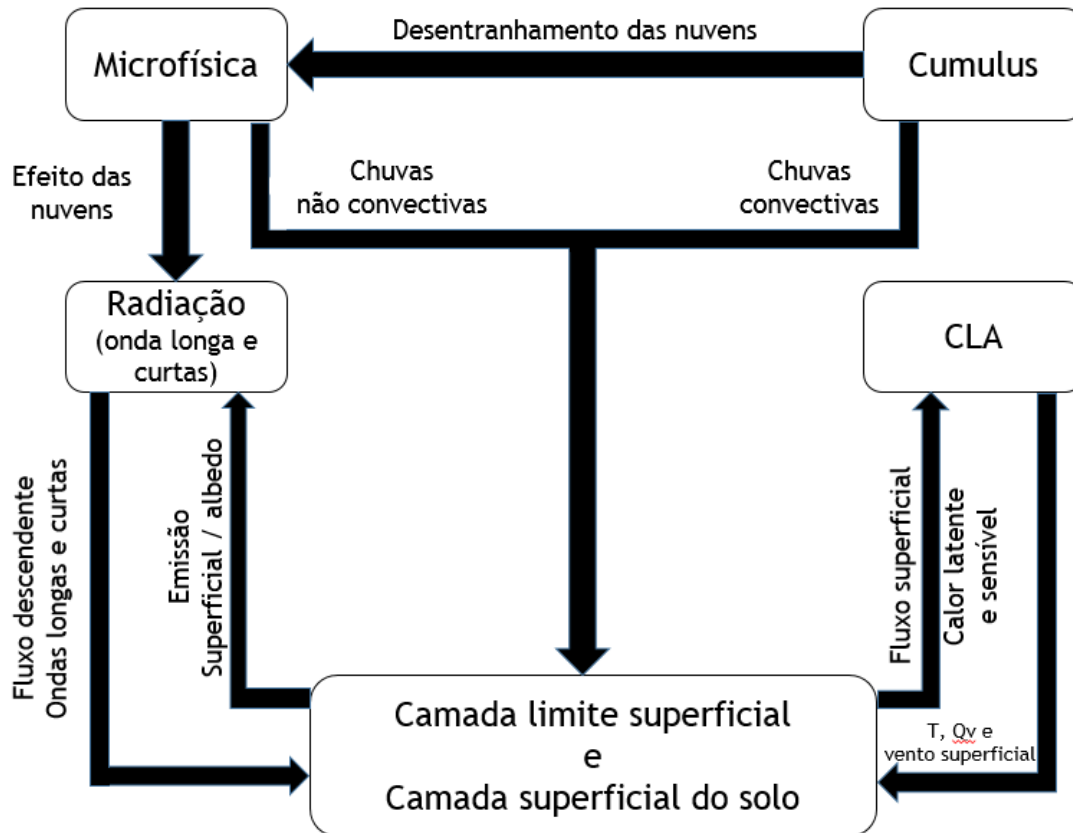


FIGURA 3: Processos físicos e suas interações no modelo WRF. Fonte: Adaptado de Dudhia (2012).

Devido a que o objetivo principal desta dissertação consiste em avaliar o desempenho das diferentes parametrizações físicas para modelagem da CLA utilizadas no modelo WRF (*bl\_pbl\_physics*) (TABELA 1), estas serão as únicas que serão descritas detalhadamente. Para uma maior informação das demais parametrizações físicas do modelo pode-se consultar o manual deste.

TABELA 1: Dependência entre parametrizações da CLA e da CLS.

<b>bl_pbl_physics*</b>	<b>Esquema</b>	<b>sf_sfclay_physics*</b>
<b>1</b>	YSU	1, 91
<b>2</b>	MYJ	2
<b>3</b>	NCEP	3
<b>4</b>	QNSE**	4
<b>5</b>	MYNN2**	1, 2, 5, 91
<b>6</b>	MYNN3**	1, 2, 5, 91
<b>7</b>	ACM2	1, 91
<b>8</b>	Boulac	1, 2, 91
<b>9</b>	UW	1, 2, 91
<b>10</b>	TEMF	10
<b>12</b>	GBM	1, 91
<b>99</b>	MRF	1, 91

\*Número que representa a parametrização física que será utilizada no “namelist.input” que é o arquivo onde o usuário desenha a corrida do software.

\*\*Estas opções não serão utilizadas já que tem como objetivo melhorar as modelagens em regiões geladas e com presença de neblina, o qual não é o caso da região de estudo.

### 3.2.2.1. Parametrizações microfísica

No modelo WRF a microfísica resolve os processos explícitos que envolvem as interações e/ou mudanças de estado que ocorrem entre as massas de vapor d’água, chuva, neve, gelo, nuvens e granizo presentes nas regiões dos domínios do modelo. Esta é resolvida no final do passo de tempo como um processo de ajustamento para garantir que o balanço final da saturação seja mais preciso para incrementar a temperatura e a umidade. Isto também é importante para ter a forçante do calor latente para a temperatura potencial durante os sub-passos dinâmicos e isto é feito através do acúmulo desse calor para o próximo passo do tempo (C. Skamarock, et al., 2008).

### 3.2.2.2 Parametrizações de cumulus

As parametrizações de cúmulus do WRF são responsáveis pelos efeitos sub-grade, os quais descrevem estes parâmetros numa escala menor à grade utilizada pelo modelo para nuvens convectivas e/ou baixas. Estes esquemas são destinados para representar fluxos verticais devido a correntes ascendentes (*updrafts*) e descendentes (*downdrafts*) e os movimentos compensatórios fora das nuvens (FIGURA 4). O esquema é iniciado e operando em colunas individuais que proporcionam os perfis verticais de calor e umidade (C. Skamarock, et al., 2008).

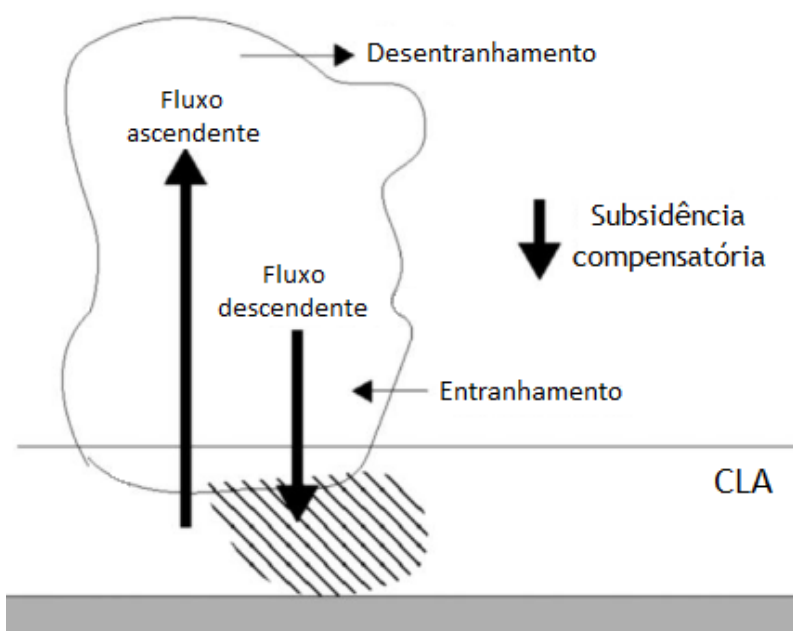


FIGURA 4: Processos físicos simulados pelas parametrizações de cumulus no modelo WRF. Fonte: Adaptado de Dudhia (2012).

Estes esquemas são válidos só para tamanhos das grades grandes (maiores do que 10 km) quando estes são necessários para calcular os perfis verticais de calor latente em uma escala de tempo realística em colunas convectiva. Estes são úteis para espaçamentos de malha entre 5 e 10 km. Geralmente estas parametrizações para cumulus são utilizadas em domínios com espaçamento de grade menor ou igual a 5 km, isto devido a que o modelo pode resolver os vórtices convectivos de forma implícita em grades com este espaçamento (C. Skamarock, et al., 2008).

A simulação da nebulosidade é importante devido a que esta afeta a quantidade de energia disponível para esquentar a superfície depois da reflexão, dispersão e absorção da radiação solar

entrante antes que esta incida na superfície. Isto pode afetar a quantidade de energia disponível para o balance de energia na superfície (COMET, 2016).

### 3.2.2.2. Parametrizações CLA

Os esquemas da física da CLA do WRF (*bl\_pbl\_physics*) determinam os fluxos verticais em uma escala sub-malha os quais descrevem estes parâmetros numa escala menor à grade utilizada pelo modelo devido ao transporte por vórtices turbulentos proporcionando tendências atmosféricas da temperatura, umidade (incluindo as nuvens) e o momentum horizontal em toda a coluna atmosférica, não só na CLA. Quando algum destes esquemas é acionado, o esquema de difusão vertical é desligado e o esquema de CLA assume este processo (C. Skamarock, et al., 2008).

Na FIGURA 5 são esquematizados os processos e a sua distribuição ao longo do perfil vertical da atmosfera, desde o solo até a atmosfera livre.

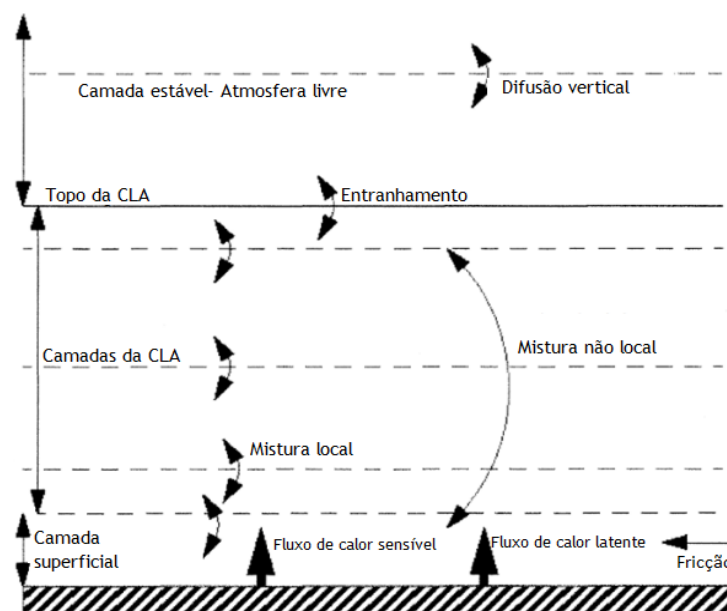


FIGURA 5: Processos modelados pelo WRF e a sua distribuição ao longo do perfil vertical da atmosfera. Fonte: Adaptado de Dudhia (2012).

As escolhas mais apropriadas para a difusão horizontal são aquelas baseadas na deformação horizontal ou valores de  $K_h$  constantes onde a mistura horizontal e vertical são tratadas de forma independente. (C. Skamarock, et al., 2008).

A viscosidade horizontal dos vórtices turbulentos ( $K_h$ ) é determinado pela deformação horizontal usando o enfoque de fechamento de primeiro ordem Smagorinsky. Esta formulação define e discretiza a viscosidade dos vórtices turbulentos assim:

$$K_h = C_s^2 l^2 \left[ 0,25(D_{11} - D_{22})^2 + \overline{D_{12}^2}^{xy} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{EQ 10}$$

Onde,  $C_s$  é uma constante (0,25),  $l = (\Delta x \Delta y)^{1/2}$  é a escala de comprimento (quantidade física que descreve o tamanho dos vórtices em um fluxo turbulento) e  $D$  é o tensor e suas deformações ( $D_{11}$ ,  $D_{22}$  e  $D_{12}$ )  $D = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u^i}{\partial x^j} + \frac{\partial u^j}{\partial x^i} \right)$ .

O enfoque principal destas parametrizações, chamado teoria  $K$  (EQ. 11), resolve os fluxos médios turbulentos na atmosfera analogamente com a teoria de difusão molecular (Stull, 2000).

$$\text{Fluxo} = -k \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad \text{EQ 11}$$

Onde,  $k$  é o coeficiente de difusividade dos turbilhões na atmosfera,  $\phi$  é a propriedade atmosférica e  $z$  é a altitude (Stull, 2000).

A razão da transferência turbulenta das propriedades atmosféricas é proporcional ao parâmetro  $K$ , chamado viscosidade ou difusividade do turbilhão o qual tem unidades de  $m^2/s$  (Stull, 2000).

Algumas das parametrizações físicas da CLA do WRF apresentam uma hipótese de fechamento local onde só podem-se misturar as propriedades atmosféricas das camadas contíguas e outras não locais onde as propriedades atmosféricas de uma camada podem-se misturar com as de qualquer outra camada da CLA, simulando assim a ação de mistura dos grandes turbilhões (FIGURA 6). Em termos gerais, o fechamento é o laço entre as suposições de parametrização do modelo e as variáveis prognosticadas. No caso da CLA, as variáveis prognosticadas para a superfície e perto desta são utilizadas para estimar a quantidade de energia hidrostática e mecânica que estará disponível para recrear esta camada no modelo. A exatidão do fechamento depende do nível de interação interna que é incluída nos cálculos (COMET, 2016).

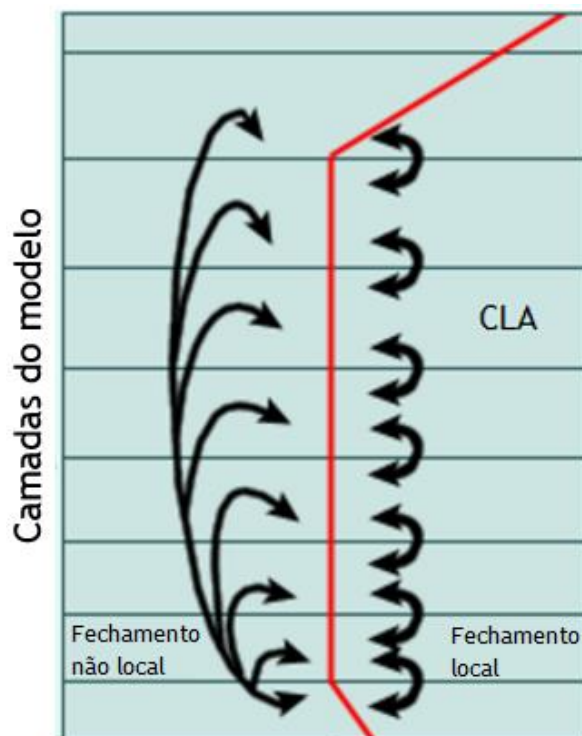


FIGURA 6: Hipótese de fechamento local e não local. Fonte: (COMET, 2016)

A utilização destes esquemas dependem da região de estudo, já que segundo isto, os turbilhões de tamanhos embaixo de algumas centenas de metros podem se tornar menos visíveis (Santiago, 2009).

### 3.2.2.3.1. Esquema Yonsei University (YSU)

O esquema YSU ( $bl\_pbl\_physics = 1$ ) tem uma hipótese de fechamento não local e apresenta uma inclusão no tratamento explícito dos processos de entranhamento na parte superior da CLA. Este aumenta a mistura na CLA no regime de convecção livre induzida termicamente e diminui esta no regime de convecção forçada induzida mecanicamente, é resolvida a mistura excessiva na camada de mistura em presença de ventos fortes e reproduz uma estrutura e um desenvolvimento muito mais realista da CLA (Hon, et al., 2005).

A mistura não local é expressada pelo esquema adicionando um gradiente não local como termo de ajuste ( $\gamma_c$ ) ao gradiente local de cada variável média prognosticada para os componentes de calor e momentum (EQ 12) (Hailey Shin & Hong, 2011).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_c \left( \frac{\partial C}{\partial z} - \gamma_c \right) - \overline{(w'c')}_h \left( \frac{z}{h} \right)^3 \right] \quad \text{EQ 12}$$



Onde,  $K_c$  é o coeficiente de difusividade turbulenta,  $\gamma_c$  é a correção do gradiente local que incorpora a contribuição dos turbilhões a grande escala no fluxo total,  $(w'c')_h$  é o fluxo na camada de inversão,  $-\overline{(w'c')}(z/h)^3$  representa o fluxo de entranhamento assintótico à camada de inversão e  $h$  é a altura da CLA. Acima da camada de mistura ( $z > h$ ), é aplicado um enfoque de difusão local que tem em conta a difusão na atmosfera livre (Hon, et al., 2005).

Para a camada estável, o esquema local no qual o coeficiente de mistura está em função do número de Richardson em um nível determinado do modelo é trocado por uma difusão melhorada baseada no número global de Richardson (*BRN*, pelas suas siglas no inglês de Bulk Richardson Number) entre a camada superficial e o topo da CLA (Hailey Shin & Hong, 2011).

A difusão na camada de mistura neste esquema é formulado por uma série de equações que serão apresentadas a continuação.

O coeficiente de difusão do momentum ( $K_m$ ) é formulado assim (EQ. 13):

$$K_m = kw_s \left(1 - \frac{z}{h}\right)^p \quad \text{EQ 13}$$

Onde,  $p$  é o expoente da forma do perfil tomado com um valor de 2,  $k$  é a constante de Kármán (= 0,4),  $z$  é a altura desde a superfície,  $h$  é altura da CLA e  $w_s$  a escala de velocidade (EQ 14) (Hon, et al., 2005).

$$w_s = \left(u_*^3 + \Phi_m kw_*^3 z/h\right)^{1/3} \quad \text{EQ 14}$$

Aqui  $u_*$  é a velocidade de ficção na superfície,  $\Phi_m$  é a função do perfil de vento avaliado no topo da camada superficial e  $w_{*b}$  é a velocidade convectiva do ar úmido (Hon, et al., 2005).

O termo contra gradiente para a temperatura potencial ( $\theta$ ) e o momentum é dado assim (EQ 15):

$$\gamma_c = b \frac{\overline{(w'c')}_0}{w_{s0}h} \quad \text{EQ 15}$$

Onde  $(w'c')_0$  corresponde aos fluxos superficiais para  $u$ ,  $v$  e  $\theta$ ,  $w_{s0}$  é a velocidade do ar na camada de mistura definida como a velocidade em  $z=0,5h$  e  $b$  é um coeficiente de proporcionalidade (Hon, et al., 2005).

Os termos de substancias aquosas incluindo vapor d'água ( $q$ ) não são incluídos na mistura contra gradiente, isto quer dizer que a temperatura potencial e os componentes da velocidade horizontal são as únicas variáveis que tem em conta o termo não local devido à mistura contra gradiente (Hon, et al., 2005).

A difusividade turbulenta para a temperatura e a umidade  $k_t$  é calculado do  $k_m$  da EQ 13 usando a relação com o número de Prandtl que é dado por (EQ 16):

$$Pr = 1 + (Pr_0 - 1) \exp[-3(z - \varepsilon h)^2 / h^2] \quad \text{EQ 16}$$

Aqui  $Pr_0$ ,  $(\Phi_v \Phi_m + bk\varepsilon)$ , é o número de Prandtl no topo da camada superficial e  $\varepsilon$  é a razão da altura da camada superficial com a altura da CLA (0,1) (Hon, et al., 2005).

Para satisfazer a compatibilidade entre o topo da camada superficial e o fundo da CLA são utilizadas funções de perfil idênticas na física da camada superficial. Primeiro para condições instáveis e neutras  $[(w'\theta')_0 \geq 0]$  (EQ 17) (Hon, et al., 2005)

$$\Phi_m = \left(1 - 16 \frac{0,1h}{L}\right)^{-1/4} \text{ para } u \text{ e } v \text{ e } \Phi_t = \left(1 - 16 \frac{0,1h}{L}\right)^{-1/2} \text{ para } \theta \text{ e } q \quad \text{EQ 17}$$

Enquanto que para condições estáveis  $((w'\theta')_0 < 0)$  (EQ 18) (Hon, et al., 2005)

$$\Phi_m = \Phi_t = \left(1 + 5 \frac{0,1h}{L}\right) \quad \text{EQ 18}$$

Onde,  $h$  é a altura da CLA e  $L$  é escala de longitude de Monin–Obukhov (Hon, et al., 2005).

A quantidade do fluxo de calor na camada de inversão é expressado por (EQ 19) (Hon, et al., 2005),

$$(w'\theta')_h = -e_1 w_m^3 / h \quad \text{EQ 19}$$

Em EQ 19  $e_1$  é o coeficiente dimensional ( $=4.5 \text{ m}^{-1} \text{ s}^2 \text{ K}$ ) e  $w_m$  é a escala de velocidade baseada na turbulência na camada superficial (Hon, et al., 2005).

O fluxo na camada de inversão de  $\theta$  e  $q$  e as quantidades dos vetores  $u$  e  $v$  é proporcional ao aumento de cada variável nesta camada (Eq 20a, Eq. 20b, Eq.20c e Eq.20d) (Hon, et al., 2005),

$$(w'\theta')_h = w_e \Delta\theta|_h \quad \text{EQ 20a}$$

$$(w'q')_h = w_e \Delta q|_h \quad \text{EQ 20b}$$

$$(w'u')_h = P_r w_e \Delta u|_h \quad \text{EQ 20c}$$

$$(w'v')_h = P_r w_e \Delta v|_h \quad \text{EQ 20d}$$

Onde,  $Pr$  é o número Prandtl,  $\Delta\theta|_h$ ,  $\Delta q|_h$ ,  $\Delta u|_h$  e  $\Delta v|_h$  são as mudanças de temperatura, umidade e as componentes horizontais das velocidades do vento na altura da CLA e  $w_e$  é a razão de entranhamento na camada de inversão que é expressado assim (EQ 21) (Hon, et al., 2005),

$$w_e = \frac{(\overline{w'\theta'_v})_h}{\Delta\theta_v|_h} \quad \text{EQ 21}$$

Aqui a magnitude máxima de  $w_e$  é limitada por  $w_m$  para evitar o entranhamento forte excessivo em presença de um aumento muito pequeno da temperatura potencial virtual ( $\theta_v$ ) no denominador. O número de Prandtl na camada de inversão ( $Pr_h$ ) é estabelecido com um valor de 1 e o fluxo de água líquida nesta camada é considerada como zero pelo esquema (Hon, et al., 2005).

Verificando a estabilidade entre o nível mais baixo do modelo e os níveis superiores, considerando a perturbação de temperatura devido ao fluxo convectivo superficial (EQ 22), esta parametrização determina  $h$  como o primeiro nível neutral da coluna atmosférica toda modelada (Hon, et al., 2005).

$$\theta_v(h) = \theta_{va} + \theta_T \left[ = a \frac{(\overline{w'\theta'_v})_0}{w_{s0}} \right] \quad \text{EQ 22}$$

Em EQ 22  $\theta_v(h)$  é a temperatura potencial virtual em  $h$ ,  $\theta_T$  é termo do excesso térmico perto da superfície,  $a$  é um fator de proporcionalidade igual a 6,8,  $\theta_{va}$  é a temperatura virtual potencial no

nível mais baixo do modelo,  $w_{so}$  é a velocidade do ar na camada de mistura no nível mais baixo do modelo e  $(w'\theta'_v)_0$  é o fluxo de calor virtual desde a superfície terrestre (Hon, et al., 2005).

Para a atmosfera livre acima da camada de mistura ( $z > h$ ), o esquema utiliza a teoria  $K$  ou esquema de difusão local e tem também em consideração os fluxos na camada de entranhamento que penetram na atmosfera livre. Acima de  $h$  a parametrização YSU calcula os coeficientes de difusão vertical para momentum ( $u$  e  $v$ ) e massa ( $\theta$  e  $q$ ) assim (Hon, et al., 2005):

$$K_{m\_loc; t\_loc} = l^2 f_{m,t}(\text{Rig}) \frac{\partial u}{\partial z} \quad \text{EQ 23}$$

Onde,  $l$  é o comprimento de mistura,  $f_{m,t}(\text{Rig})$  é a função de estabilidade e  $\frac{\partial u}{\partial z}$  é o cisalhamento vertical do vento (Hon, et al., 2005).

### 3.2.2.3.2. Esquema Mellor-Yamada-Janjic (MYJ)

O MYJ (`bl_pbl_physics = 2`) é uma versão modificada do esquema ETA do modelo MM5 o qual tem como objetivo principal melhorar a interação entre a atmosfera e a superfície subjacente tanto em terreno de alta quanto de baixa elevação mediante a adição da subcamada viscosa (camada sobre o oceano onde o transporte vertical é determinado pela difusão molecular) e uma camada turbulenta acima desta onde o transporte das propriedades atmosféricas é definido inteiramente pelos fluxos turbulentos (Janjic, 1994 ). Este esquema reavalia o esquema da PBL Mellor-Yamada nível 2.5 (MY2.5) de mistura vertical local e tem um fechamento TKE o que quer dizer que precisa de uma equação adicional para calcular a energia cinética turbulenta (Turbulence Kinetic Energy –TKE) que quantifica o componente da perturbação do movimento que caracteriza a magnitude da turbulência na CLA e permite determinar os coeficientes de difusão turbulenta para o momentum e o calor ( $K_M$  e  $K_H$  respectivamente) para a mistura turbulenta local (EQ 24) (Gacek, 2014).

$$K_{Msf} = lqS_M \text{ e } K_{Hsf} = lqS_H \quad \text{EQ 24}$$

Em EQ 24  $l$  representa a escala de comprimento turbulenta,  $S_M$  e  $S_H$  são coeficientes de proporcionalidade para momentum e calor respectivamente e  $q$  é o conteúdo total de umidade no ar.

Segundo Mellor and Yamada (1992) e Janjic (1990), os coeficientes de difusão turbulenta para calor e momentum são proporcionais ao quadrado de  $l$ .

A escala de comprimento ( $l$ ) é reavaliada e a sua nova formulação matemática é (Janjic, 1994):

$$l = \frac{l_0 k z}{kz + l_0}, \quad l_0 = \alpha \frac{\int_{P_T}^{P_S} |z| q dp}{\int_{P_T}^{P_S} q dp}, \quad \alpha = \text{constante} \quad \text{EQ 25}$$

Na EQ 25  $P_S$  e  $P_T$  representam as pressões no fundo e no topo da atmosfera modelada respectivamente,  $k$  é a constante de Kármán (0,4),  $l_0$  é a escala de comprimento da turbulência na interfase da camada viscosa e a camada turbulenta,  $q$  é a unidade específica do ar,  $z$  é altura com respeito ao solo,  $dp$  é a mudança de pressão com respeito à altura e  $\alpha$  é uma constante empírica.

O modelo de fechamento MY2.5 é utilizado para calcular a difusão vertical turbulenta e tem como principal característica o uso de uma equação diferencial que permite calcular o desenvolvimento espaciotemporal da TKE ( $e$ ) (EQ 26) (Gerrity Jr. & Black, 1994):

$$e = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{q^2}{2} \right) + \mathbf{V} \cdot \nabla \frac{q^2}{2} - \frac{\partial}{\partial z} \left[ K \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{q^2}{2} \right) \right] = P_s + P_b - \varepsilon \quad \text{EQ 26}$$

Os termos da esquerda da EQ 26 representam a taxa local de variação, advecção para as três direções médias do vento ( $\mathbf{V}$ ) e a difusão vertical turbulenta da TKE ( $q^2/2$ ). Nos termos da direita  $P_s$  representa a produção de cisalhamento da TKE,  $P_b$  representa a produção de empuxo e  $\varepsilon$  é a taxa de dissipação da TKE (Gerrity Jr. & Black, 1994)

Este esquema aplica uma mistura e uma difusividade local desde o nível vertical mais baixo até o mais alto do modelo tanto para a camada estável quanto para a camada de mistura e não tem uma separação entre a CLA e a mistura na atmosfera livre pelo qual o entranhamento é representado usando um coeficiente de difusão turbulenta calculado a partir do prognóstico da TKE perto do topo da CLA (Gacek, 2014).

Nesta formulação a escala de comprimento de turbulência é projetada para representar a escala espacial onde os turbilhões turbulentos apresentam suas propriedades de mistura e a TKE representa a intensidade com a qual a mistura é levada a cabo (Tardif & Hacker, 2006).

A parametrização MYJ tem um ênfase especial nos esquemas de convecção profunda (processo de mistura turbulenta termicamente induzido que toma parcelas de ar desde a baixa atmosfera até acima dos 500 hPa) e convecção rasa (processo de mistura turbulenta termicamente induzido onde o movimento vertical é limitado até os 500 hPa) (Janjic, 1994) (National Oceanic and Atmospheric Administration, s.d.). Um dos postulados básicos deste esquema é que as características básicas destes regimes convectivos podem ser caracterizados por um parâmetro adimensional chamado “eficiência da nuvem” ( $E$ ) (“cloud efficiency” em inglês) (EQ 27) (Janjic, 1994).

$$E = Const_1 \frac{\bar{T} \Delta S}{C_p \Sigma \Delta T \Delta p} \quad \text{EQ 27}$$

Onde,  $Const_1$  é uma constante adimensional que é estimada experimentalmente ( $= 5$ ),  $\Delta S$  é a mudança no valor da entropia da nuvem,  $C_p$  é a capacidade calorífica do ar,  $\bar{T}$  é a temperatura média da nuvem,  $\Delta T$  é a mudança de temperatura na nuvem e  $\Delta p$  é a mudança na profundidade das camadas do modelo em termos de pressão. A eficiência da nuvem é proporcional à temperatura média da nuvem e a mudança da entropia e é medida como a capacidade da coluna convectiva para transportar a entalpia para cima e ao mesmo tempo produzir a menor precipitação possível (Janjic, 1994).

O forçamento convectivo na atmosfera neste esquema é proporcional à  $E$  a qual tem relação com os fluxos de calor e umidade no modelo (EQ 28) (Janjic, 1994).

$$\Delta T = (T_{ref} - T^n) \frac{\Delta t}{\tau / F(E)} \quad \Delta q = (q_{ref} - q^n) \frac{\Delta t}{\tau / F(E)} \quad \text{EQ 28}$$

Onde, o subscrito “*ref*” indica os perfis de equilíbrio de referência de temperatura ( $T$ ) e umidade ( $q$ ) (Betts 1986) e os sobrescritos “*n*” indicam os valores de temperatura e umidade específica nos níveis do modelo ao começo do passo do tempo (time step “ $\Delta t$ ”),  $\Delta T$  e  $\Delta q$  são as mudanças de temperatura e umidade específica que se apresentam nos movimentos convectivos para o passo do tempo e  $\tau$  é a constante do tempo de relaxação cujo valor define se os regimes convectivos serão considerados rápidos ou devagar segundo o tempo de relaxação (Janjic, 1994).

Este esquema postula que não tem um estado de equilíbrio convectivo simples senão uma série de estados de equilíbrio através da coluna atmosférica, identificados através dos perfis de umidade, e que o topo das nuvens é identificado de acordo com um aumento na umidade relativa (Janjic, 1994).

A subcamada viscosa, que é um enfoque principal desta parametrização, só funciona sobre a água devido a que sobre a terra a superfície de profundidade finita é utilizada com o fim de descrever a evolução das variáveis no limite inferior. É por isto que ao momento de estimar os fluxos superficiais não são usadas as variáveis de superfície senão os valores médios representativos da porção de solo. Sendo esta uma camada plana, as equações que descrevem os fluxos de calor ( $\theta$ ), umidade ( $q$ ) e momentum ( $U$ ) na proximidade imediata desta são (Janjic, 1994):

$$U_0 - U_s = D_1 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{zu_*}{D_1 \nu}\right) \right] \left( \frac{F_u}{u_*} \right) \quad \text{EQ 29}$$

$$\theta_0 - \theta_s = D_2 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{zu_*}{D_2 \chi}\right) \right] \left( \frac{F_\theta}{u_*} \right) \quad \text{EQ 30}$$

$$q_0 - q_s = D_3 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{zu_*}{D_3 \lambda}\right) \right] \left( \frac{F_q}{u_*} \right) \quad \text{EQ 31}$$

Aqui o subscrito “s” indica valores superficiais, o subscrito “0” indica valores a uma altitude  $z$  sobre a superfície onde predomina a difusividade molecular,  $u_*$  é a velocidade de fricção;  $\nu$ ,  $\chi$  e  $\lambda$  são difusividades moleculares para o momentum, calor e vapor d’água respectivamente,  $D_1$  (EQ 32),  $D_2$  (EQ 33) e  $D_3$  (EQ 34) são parâmetros do esquema, e  $F_u$ ,  $F_\theta$  e  $F_q$  são os fluxos de momentum, calor e vapor d’água acima da subcamada viscosa (Janjic, 1994 ).

$$D_1 = MR_r^{1/4} \quad \text{EQ 32}$$

$$D_2 = MR_r^{1/4} Pr^{1/2} \quad \text{EQ 33}$$

$$D_3 = MR_r^{1/4} Sc^{1/2} \quad \text{EQ 34}$$

Aqui  $Rr$  é o número de Reynolds,  $Pr$  é o número de Prandtl ( $\nu/\chi$ ),  $Sc$  ( $\nu/\lambda$ ) é o número de Schmidt e  $M$  é uma constante que é diferente para os diferentes regímenes de fluxo (Janjic, 1994 ).

A profundidade da subcamada viscosa para  $U$  (EQ 35),  $\theta$  (EQ 36),  $q$  (EQ 37) são definidas assim (Janjic, 1994 ):

$$Z_U = \frac{\zeta \nu D_1}{u_*} \quad \text{EQ 35}$$

$$Z_\theta = \frac{\zeta \chi D_2}{u_*} \quad \text{EQ 36}$$

$$Z_q = \frac{\zeta \lambda D_3}{u_*} \quad \text{EQ 37}$$

Onde,  $Z_U$ ,  $Z_\theta$ , e  $Z_q$  são as profundidades da subcamada viscosa para  $U$ ,  $\theta$  e  $q$  respectivamente,  $\nu$ ,  $\chi$  e  $\lambda$  são difusividades moleculares para  $U$ ,  $\theta$  e  $q$  respectivamente,  $u_*$  é a velocidade de ficção e  $\zeta$  é um argumento que significa o elemento exponencial das equações 29, 30 e 31  $\left( \frac{\zeta u_*}{D_1 \nu} = \frac{\zeta u_*}{D_2 \chi} = \frac{\zeta u_*}{D_3 \lambda} = \zeta \right)$  (Janjic, 1994 ).

Os fluxos turbulentos para  $U$  ( $F_U$ ),  $\theta$  ( $F_\theta$ ) e  $q$  ( $F_q$ ) na camada superficial acima da subcamada viscosa são representados por (Janjic, 1994 ):

$$F_U = \left( \frac{K_{Msfc}}{\Delta z_\theta} \right) (U_{lm} - U_0) \quad \text{EQ 38}$$

$$F_\theta = \left( \frac{K_{Hsfc}}{\Delta z_\theta} \right) (\theta_{lm} - \theta_0) \quad \text{EQ 39}$$

$$F_q = \left( \frac{K_{Hsfc}}{\Delta z_\theta} \right) (q_{lm} - q_0) \quad \text{EQ 40}$$

Onde,  $K_{Msfc}$  e  $K_{Hsfc}$  são os coeficientes de intercambio de momentum e calor respectivamente, o subscrito “0” indica as quantidades físicas relevantes nas interfases da camada viscosa e a camada turbulenta, o subscrito “lm” indica as variáveis no nível mais baixo do modelo,  $\Delta z_\theta$  é a altura equivalente do nível mais baixo do modelo que tem em conta a presença da camada dinâmica turbulenta no fundo da camada superficial ( $z_{lm} - z_0$ ). Na camada dinâmica turbulenta superficial a



razão entre a altura  $z$  e a escala de longitude de Monin-Obukhov é pequena, pelo qual são utilizados os perfis logarítmicos para o momentum, o calor e a umidade (Janjic, 1994 ).

A subcamada viscosa sobre os oceanos é assumida para operar em 3 regimes diferentes: (I) laminar e de transição, (II) rugoso e (III) rugoso com spray dependendo do número de Reynolds (EQ 41) (Janjic, 1994 ).

$$R_r = \frac{Z_0 u_*}{\nu} \quad \text{EQ 41}$$

$$Z_0 = \frac{0,11\nu}{u_*} + \frac{0,018u_*^2}{g} \quad \text{EQ 42}$$

$$u_* = \left[ \left( \frac{K_{M_{sf}}}{\Delta z_e} \right) (U_{lm} - U_0) \right]^{1/2} \quad \text{EQ 43}$$

Aqui,  $z_0$  (EQ 42) é a altura da interfase da camada viscosa e a camada turbulenta,  $u_*$  (EQ 43) é a velocidade de fricção e  $\nu$  é a viscosidade molecular do ar do momentum (0,000015),  $K_{M_{sf}}$  é o coeficiente de intercambio de momentum, o subscrito “0” indica as quantidades físicas relevantes nas interfases da camada viscosa e a camada turbulenta, o subscrito “lm” indica as variáveis no nível mais baixo do modelo,  $\Delta z_e$  é a altura equivalente do nível mais baixo do modelo que tem em conta a presença da camada dinâmica turbulenta no fundo da camada superficial e  $g$  é a força de gravidade (Janjic, 1994 ).

### 3.2.2.3.3. Esquema NCEP – Sistema de prognostico global

A parametrização NCEP (bl\_pbl\_physics = 3), com hipótese de fechamento não local, contém esquemas de convecção e da CLA melhorados. No esquema de convecção profunda a convecção dos cumulus é muito mais intensa e profunda, o que reduz a instabilidade na coluna atmosférica e elimina a precipitação excessiva na modelagem e o esquema da CLA foi revisado com o fim de melhorar a difusão turbulenta em regiões com presença de estrato-cumulus, regiões que tem nuvens baixas (de 0 a 2 km) e densas, o que permite prever a formação excessiva de nuvens baixas (Han & Pan, 2011).

A primeira coisa que tem em conta o esquema de convecção superficial é a camada convectivamente instável que é definida como a camada entre o nível de condensação por ascenso

(Lifting Condensation Level - LCL) e o primeiro nível natural por acima deste (não maior ao nível de 700 hPa). A mistura vertical de calor e umidade na camada de mistura é simulada usando um perfil parabólico de difusividade turbulenta com um valor máximo de  $5 \text{ m}^2/\text{s}$  e o fluxo de massa desde a base das nuvens ( $m_b$ ) (EQ 44) é dado em função do fluxo convectivo superficial (Han & Pan, 2011).

$$m_b = 0,03\rho w_* \quad \text{EQ 44}$$

Em EQ 44  $\rho$  é a densidade do ar e  $w_*$  é a escala de velocidade convectiva (EQ 45) (Han & Pan, 2011).

$$w_* = [(g/T_0)(\overline{w'\theta'_v})_0 h]^{1/3} \quad \text{EQ 45}$$

Onde,  $g$  é a gravidade,  $T_0$  é a temperatura de referência,  $(\overline{w'\theta'_v})_0$  é o fluxo cinemático de calor virtual superficial e  $h$  é a altura da CLA (Han & Pan, 2011).

A diferença do esquema de convecção profunda onde o nível onde começa a convecção é definido como o nível de maior energia estática úmida entre a superfície e o nível de 700 hPa, no esquema de convecção rasa este nível é considerado como o nível de maior energia estática úmida dentro da CLA. O nível de convecção livre (NCL) é utilizado no esquema como a base das nuvens e o topo destas é limitado por  $P/P_s = 0,7$  (onde  $P$  é o nível de pressão e o subscrito “s” representa a superfície do solo) (Han & Pan, 2011).

No esquema de convecção profunda, o fluxo de massa máximo desde a base das nuvens ( $m_{bmax}$ ) é dado por (Han & Pan, 2011):

$$m_{bmax} = \frac{\Delta p}{g\Delta t} \quad \text{EQ 46}$$

Onde,  $\Delta p$  é a profundidade da camada do modelo na base das nuvens,  $\Delta t$  é o passo do tempo (time step) e  $g$  é a gravidade.

Este esquema apresenta taxas finitas de entranhamento e desentranhamento para  $\theta$ ,  $q$  e  $U$  acima da base das nuvens. Segundo Bechtold et al. (2008), a taxa de entranhamento ( $\varepsilon$ ) é dada por (EQ 47) (Han & Pan, 2011):

$$\varepsilon = \varepsilon_0 F_0 + d_1 (1 - RH) F_1 \quad \text{EQ 47}$$

Onde,  $\varepsilon_0$  é a taxa de entranhamento na base das nuvens,  $F_0$  e  $F_1$  são funções adimensionais da escala vertical (diminuem com a altura),  $d_1$  é um parâmetro ajustável (com um valor de  $10^{-4}$ ) e RH é a umidade relativa ambiental.

$$F_0 = \left( \frac{\bar{q}_s}{q_{sb}} \right)^2, \quad F_1 = \left( \frac{\bar{q}_s}{q_{sb}} \right)^3 \quad \text{EQ 48}$$

Em EQ 48  $q_s$  e  $q_{sb}$  são as umidades específicas de saturação no nível da parcela do ar e o nível da base das nuvens respectivamente. A EQUAÇÃO 47 indica que uma baixa RH no ambiente incrementa o entranhamento, suprimindo a convecção (Han & Pan, 2011).

Os efeitos da força do gradiente de pressão da convecção induzida no transporte do momentum dos cumulus é incluído tanto na parametrização de convecção rasa quanto na de convecção profunda. Para descrever o momentum das nuvens dentro de uma corrente ascendente de ar e o “feedback” no ambiente no esquema estão as seguintes equações respectivamente (Han & Pan, 2011).

$$\frac{\partial V}{\partial z} = \varepsilon (\bar{V} - V) + f_1 \frac{\partial \bar{V}}{\partial z} \quad \text{EQ 49}$$

$$\frac{\partial \bar{V}}{\partial z} = \varepsilon (1 - f_1) M \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{V}}{\partial z} + \delta (\bar{V} - V) \quad \text{EQ 50}$$

Onde,  $V$  é o componente instantâneo horizontal do vetor vento,  $\bar{V}$  é o valor médio do vetor vento,  $\varepsilon$  é a taxa de entranhamento,  $f_1$  é uma constante empírica que representa os efeitos da força do

gradiente de pressão da convecção induzida ( $= 0,55$ ),  $\delta$  é um operador matemático de nome delta de Kronecker,  $M$  é o fluxo de massa ascendente e  $z$  é altura (Han & Pan, 2011).

O esquema NCEP, baseado no modelo GFS (Global Forecast System), tem uma modificação na parametrização da CLA que aumenta o esquema de difusão vertical em regiões que apresentam estrato-cumulus. O fluxo vertical do calor no período diurno na camada de mistura é dado por (Han & Pan, 2011):

$$\overline{w'\theta'} = -\left(K_h^{surf} + K_h^{Sc}\right) \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} + K_h^{surf} \gamma_h \quad \text{EQ 51a}$$

O fluxo de calor nas camadas de ar por acima da camada de mistura e no período noturno na camada estável está dado por (Han & Pan, 2011):

$$\overline{w'\theta'} = -\left(K_h(Ri) + K_h^{Sc}\right) \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} \quad \text{EQ 51b}$$

Onde,  $K_h^{surf}$  e  $K_h^{Sc}$  são as difusividades turbulentas na superfície e na cima das nuvens respectivamente,  $\gamma_h$  é o termo de mistura contra gradiente não local devido aos grandes turbilhões presentes na atmosfera e  $K_h(Ri)$  é o coeficiente de mistura baseado no número local de Richardson (Han & Pan, 2011).

A difusividade vertical do momentum para a difusão superficial impulsada é dada por (Han & Pan, 2011):

$$K_m^{Sc} = kw_s z \left(1 - \frac{z}{h}\right)^2 \quad \text{EQ 52}$$

Onde  $k$  é a constante de Von Kármán (0,4),  $w_s$  (EQ 53) é a escala de velocidade no topo da camada superficial,  $z$  é a distância desde a superfície e  $h$  é a altura da CLA (Han & Pan, 2011).

$$w_s = (u_*^3 + 7\alpha k w_*^3)^{1/3} \quad \text{EQ 53}$$

Em EQ 53  $u_*$  é a velocidade de fricção superficial,  $\alpha$  é a relação entre a altura da camada superficial e a altura da CLA (especificada como 0,1),  $w_*$  é a escala de velocidade convectiva (EQ 45) e  $k$  é a constante de von Kármán (Han & Pan, 2011).

Segundo Lock et al. (2000), a difusividade no topo dos estrato-cumulus é dado por (Han & Pan, 2011):

$$K_m^{Sc} = 0,85kV_{Sc} \frac{(z-z_b)^2}{h_b-z_b} \left(1 - \frac{z-z_b}{h_b-z_b}\right)^{1/2} \quad \text{EQ 54}$$

Onde,  $k$  é a constante de von Kármán (0,4),  $V_{Sc}$  é a escala de velocidade de entranhamento no topo das nuvens,  $z_b$  é o nível embaixo da base da nuvem até onde a mistura turbulenta se estende,  $h_b$  é o nível do topo dos estrato-cumulus e  $z$  é a distância desde a superfície do solo (Han & Pan, 2011).

A presença de estrato-cumulus é diagnosticada pelo esquema pelo movimento descendente de uma parcela de ar desde o topo até qualquer camada de nuvens tendo o conteúdo de água líquida maior que o valor limite da relação de mistura de água líquida no ar ( $ql$ ) igual a  $3,5 \times 10^{-5} \text{ kg kg}^{-1}$ ; diagnostico limitado aos 2,5 km de altura inferiores do domínio modelado (Han & Pan, 2011).

Para evitar a erosão excessiva dos estrato-cumulus ao longo das zonas costeiras, a difusividade “background” nas camadas baixas de inversão é reduzida ao 30% quanto na camada superficial ( $0,3 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ ). Por outro lado, a difusividade “background” para o momentum foi incrementada em todo lugar do domínio modelado; o que ajuda a reduzir erros no prognostico do campo de vento (Han & Pan, 2011).

Devido a que o esquema GFS original tende a produzir uma grande quantidade de nuvens baixas em todo o globo com a nova parametrização de convecção rasa, este foi modificado. Segundo Xu e Randall (1996), a fracção de cobertura de nuvens no “grid box” ( $\sigma$ ) é dada por (Han & Pan, 2011):

$$\sigma = RH^{k_1} \left\{ 1 - \exp \left[ \frac{k_2 ql}{((1-RH)ql)^{k_3}} \right] \right\} \quad \text{EQ 55}$$

Onde,  $RH$  é a umidade relativa ambiental,  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  são coeficientes empíricos (0,25, 100 e 0,49 respectivamente),  $q_l$  é o valor limite da relação de mistura de água líquida no ar e  $q_s$  é a umidade específica de saturação no nível da parcela do ar (Han & Pan, 2011).

#### 3.2.2.3.4. Esquema de convecção assimétrica versão 2 (ACM2)

O esquema ACM2 ( $bl\_pbl\_physics = 4$ ) tem como base o esquema assimétrico convectivo (ACM) do modelo MM5. Este novo esquema foi desenvolvido para incluir no modelo ACM original, o qual tem em conta os movimentos convectivos a grande escala, a difusão turbulenta (FIGURA 7). Assim, esta parametrização pode representar os componentes do transporte turbulento na camada de mistura tanto para baixas quanto para grandes escalas (subgrid e supergrid-scale), simular alturas da CLA mais exatas, perfis de fluxos e quantidades atmosféricas médias assim como os seus valores na camada superficial (Pleim, 2006).

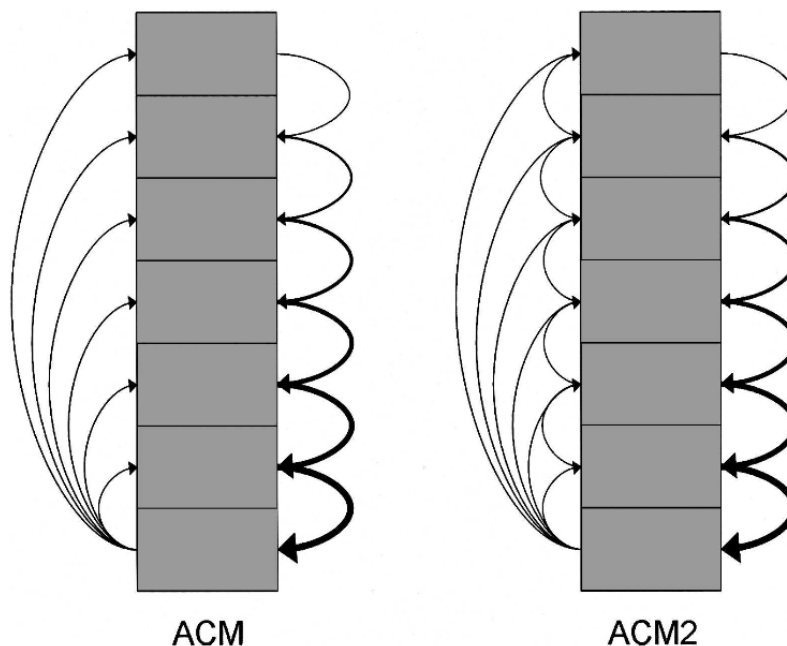


FIGURA 7: Representação da interação das camadas do modelo para: (I) o esquema original ACM e (II) o novo esquema ACM2. Fonte: (Pleim, 2006).

Esta parametrização tem um termo de ajuste ( $\gamma_h$ ) na equação de difusão turbulenta (EQ 56) (Pleim, 2006):

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \overline{(w' \theta')} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ -K_h \left( \frac{\partial \theta}{\partial z} - \gamma_h \right) \right] \quad \text{EQ 56}$$

Onde,  $K_h$  é a difusividade vertical turbulenta para o calor,  $\theta$  é a temperatura potencial e  $\overline{(w' \theta')}$  é o fluxo cinemático do calor.

Este novo esquema que apresenta uma combinação entre hipóteses de fechamento local e não local, faz coincidir as duas parametrizações (ACM e ACM2) no topo da camada mais baixa do modelo e reparte a razão de mistura entre os dois esquemas para que o fluxo resultante nesta altura seja idêntico ao fluxo produzido por cada um destes rodando cada um por separado (Pleim, 2006).

As equações implementadas pelo modelo ACM são apresentadas de forma discreta em uma grade vertical escalonada onde as quantidades escalares como o vapor d'água, espécies condensadas em água e traças de espécies químicas, assim como os componentes horizontais do momentum, são localizadas nos centros das camadas designadas pelo subscrito “ $i$ ”. Fluxos, velocidades verticais e difusividades turbulentas são localizados nas interfaces das camadas do modelo. A equação que descreve a mudança com o tempo para qualquer um escalar “ $C_i$ ” na camada “ $i$ ” do modelo no esquema não local é a seguinte (Pleim, 2006):

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = Mu C_1 - Md_i C_i + Md_{i+1} C_{i+1} \frac{\Delta z_{i+1}}{\Delta z_i} \quad \text{EQ 57}$$

Aqui  $Mu$  é a razão da mistura convectiva dos fluxos ascendentes,  $C_1$  é a razão de mistura no nível mais baixo do modelo,  $Md_i$  é a razão de mistura do fluxo descendente desde a camada  $i$  à camada  $i-1$  (EQ 57),  $Md_{i+1}$  é a razão de mistura do fluxo ascendente desde a camada  $i$  à camada  $i+1$ ,  $C_{i+1}$  é a quantidade da propriedade escalar na camada  $i+1$ ,  $z$  é a altura acima do solo,  $\Delta z_i$  é a espessura da camada  $i$  e  $\Delta z_{i+1}$  é a espessura da camada  $i+1$  (Pleim, 2006).

O fluxo das propriedades atmosféricas escalares em qualquer interface de nível  $(i+1/2)$  no esquema está dado pela seguinte equação (Pleim, 2006):

$$F_{i+1/2} = Mu(h - z_{i+1/2}) / (C_1 - C_i) \quad \text{EQ 58}$$

Onde,  $h$  é a altura da CLA,  $C_l$  é a razão de mistura no nível mais baixo do modelo,  $C_i$  é a razão de mistura na camada  $i$  e  $z_{i+1/2}$  é a altura da interface da camada  $i$ . Para o caso quando  $C$  é substituída pela temperatura potencial virtual  $\theta_v$ ,  $Mu$  é definida em termos de fluxo convectivo cinemático no topo da camada mais baixa do modelo ( $B_{l.5}$ ) (EQ 59) (Pleim, 2006).

$$Mu = B_{l.5} / [(h - z_{i+1/2})(\theta_{v1} - \theta_{v2})] \quad \text{EQ 59}$$

Além do esquema apresentar a hipótese de fechamento não local com EQ 57, a difusividade turbulenta ( $K_z$ ) é definida neste para uma CLA escalonada com a seguinte equação segundo Holtslag e Boville (1993):

$$K_z(z) = k \frac{u_*}{\Phi\left(\frac{z_s}{L}\right)} z (1 - z/h)^2 \quad \text{EQ 60}$$

Aqui  $k$  é a constante de Kármán ( $=0,4$ ),  $u_*$  é a velocidade de fricção,  $L$  é o comprimento de Monin-Obukov,  $z$  é a altura com respeito ao solo e  $h$  é a altura da CLA. Para condições estáveis ( $z_s/L < 0$ ),  $z_s = \min(z, 0,1h)$  e para condições instáveis  $z_s = z$ . As funções adimensionais para os perfis de calor ( $\Phi_h$ ) e momentum ( $\Phi_m$ ) para condições instáveis, segundo Dyer (1974), estão dados respectivamente por (Pleim, 2006):

$$\Phi_h = \left(1 - 16 \frac{z}{L}\right)^{-1/2} \quad \text{e} \quad \Phi_m = \left(1 - 16 \frac{z}{L}\right)^{-1/4} \quad \text{EQ 61}$$

Onde o comprimento de Monin-Obukov ( $L$ ) está dado por (Pleim, 2006):

$$L = \frac{T_0 u_*^2}{g k \theta_v} \quad \text{EQ 62}$$

Aqui  $T_0$  representa a temperatura média na camada superficial,  $k$  é a constante de Kármán ( $=0,4$ ),  $u_*$  é a velocidade de fricção,  $g$  é a gravidade e  $\theta_v$  é a escala de temperatura superficial definida como o fluxo cinemático superficial de calor devido a  $u_*$  (Pleim, 2006).



O esquema ACM representa o esquema não local e a difusividade turbulenta para qualquer um escalar  $C_i$  e é dada pela seguinte equação na sua forma discreta (Pleim, 2006):

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = f_{conv} Mu C_1 - f_{conv} Md_i C_i + Md_{i+1} C_{i+1} \frac{\Delta z_{i+1}}{\Delta z_i} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ K_c (1 - f_{conv}) \frac{\partial C_i}{\partial z} \right] \quad \text{EQ 63}$$

Onde  $Mu$  é a razão da mistura convectiva dos fluxos ascendentes,  $C_1$  é a razão de mistura no nível mais baixo do modelo,  $Md_i$  é a razão de mistura do fluxo descendente desde a camada  $i$  até a camada  $i-1$  (EQ 58),  $Md_{i+1}$  é a razão de mistura do fluxo ascendente desde a camada  $i$  à camada  $i+1$ ,  $C_{i+1}$  é a quantidade da propriedade escalar na camada  $i+1$ ,  $z$  é a altura acima do solo,  $\Delta z_i$  é a espessura da camada  $i$ ,  $\Delta z_{i+1}$  é a espessura da camada  $i+1$ ,  $K_c$  é o coeficiente de difusividade turbulenta e  $f_{conv}$  (EQ 64) é o parâmetro de controle que representa a contribuição da mistura não local frente à mistura local (Xie, et al., 2012).

$$f_{conv} = \left[ 1 + \frac{k^{-2/3}}{0.1a} \left( -\frac{h}{L} \right)^{-1/3} \right]^{-1} \quad \text{EQ 64}$$

Em EQ 64  $k$  é a constante de Kármán ( $=0,4$ ),  $a$  é uma constante ( $=7,2$ ),  $h$  é a altura da CLA e  $L$  é o comprimento de Monin-Obukhov (Xie, et al., 2012).

O esquema ACM2 diagnostica  $h$  pelo cálculo gradual do número global de Richardson ( $Ri_b$ ) desde o topo da camada superficial até uma altura onde  $Ri_b > Ri_{crit}$ ; metodologia que tem como vantagem que pode ser utilizada para qualquer uma condição de estabilidade, tendo como base que a CLA é uma camada onde predomina a turbulência, e para condições de instabilidade considerando a CLA como uma camada composta pela camada de convecção livre cujo topo é o nível de convecção livre e uma zona de entranhamento. Assim  $h$  é calculada como a altura acima do nível de convecção livre ou neutral onde o  $Ri_b$  calculado para a camada de entranhamento excede o valor crítico (0,25). Para condições de estabilidade  $h$  é calculado assim (Pleim, 2006):

$$h = Ri_{crit} \frac{\overline{\theta_v} U(h)^2}{g [\theta_v(h) - \theta_v(z_1)]} \quad \text{EQ 65}$$

Onde,  $\theta_v$  é a temperatura potencial,  $z_l$  é a altura do nível mais baixo do modelo,  $g$  é a gravidade,  $U(h)$  é o componente horizontal da velocidade do vento na altura de  $h$  e  $\overline{\theta_v}$  é a temperatura potencial média entre a camada 1 e  $h$ . Para condições de instabilidade, o topo da CLA é calculado como a altura na qual  $Ri_b$  (EQ 66) é igual a  $Ri_{crit}$  (Pleim, 2006).

$$Ri_b = \frac{g[\theta(h) - \theta_s](h - z_{mix})}{\overline{\theta_v}[U(h) - U(z_{mix})]^2} \quad \text{EQ 66}$$

Aqui  $g$  é a gravidade,  $h$  é a altura da CLA,  $\theta(h)$  é a temperatura em  $h$ ,  $\theta_s$  é a temperatura do ar perto da superfície do solo,  $z_{mix}$  é o topo da camada de mistura,  $\overline{\theta_v}$  é a temperatura virtual média,  $U(h)$  é a velocidade do ar em  $x$  em  $h$  e  $U(z_{mix})$  é a velocidade do ar em  $x$  no topo da camada de mistura (A. M. Holtslag, et al., 1990).

### 3.2.2.3.5. Esquema Bougeault–Lacarrère (BouLac)

O esquema BouLac (`bl_pbl_physics = 5`) conta com uma hipótese de fechamento local e está desenhado para simular de uma melhor maneira a turbulência atmosférica induzida pela orografia. Conta com a opção de predição da TKE que tem um papel importante no cálculo do coeficiente de mistura para o momentum ( $K_m$ ) (EQ 67). (Bougeault & Lacarrere , 1989).

$$K_m = K_h = C_k l_k (e)^{1/2} \quad \text{EQ 67}$$

Aqui  $K_h$  é o coeficiente de mistura para o calor,  $K_m$  é o coeficiente de mistura para o momentum,  $C_k$  é uma constante numérica,  $l_k$  é a escala de comprimento da turbulência e  $e$  é a TKE. O esquema de fechamento 1.5, utilizado pela parametrização BouLac, é baseado em uma equação de prognóstico de  $e$  (Bougeault & Lacarrere , 1989):

$$\frac{\partial s}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} \rho \overline{w' e'} - \overline{u' w'} \frac{\partial U}{\partial z} - \overline{v' w'} \frac{\partial V}{\partial z} + \beta \overline{w' \theta'} - \epsilon \quad \text{EQ 68}$$

Onde  $\beta$  ( $g/T$ ) é o coeficiente de convectividade,  $\rho$  é a densidade do ar e  $\epsilon$  é a dissipação da TKE por processos moleculares. Os termos de segundo ordem presentes na EQUAÇÃO 68 ( $\overline{u' w'}$ ,  $\overline{v' w'}$ ,  $\overline{w' e'}$  e  $\overline{w' \theta'}$ ) são parametrizados de acordo com uma aproximação do coeficiente turbulento (Bougeault & Lacarrere , 1989):

$$\begin{aligned} \overline{u' w'} &= -K_m \frac{\partial U}{\partial z} \\ \overline{v' w'} &= -K_m \frac{\partial V}{\partial z} \\ \overline{e' w'} &= -K_e \frac{\partial e}{\partial z} \\ \overline{\theta' w'} &= \begin{cases} -K_h \left( \frac{\partial \theta}{\partial z} - \gamma_{cg} \right), & \text{na camada convectiva} \\ -K_h \frac{\partial \theta}{\partial z} & \text{nos outros componentes da CLA} \end{cases} \end{aligned} \quad \text{EQ 69}$$

Os coeficientes de difusão vertical são relacionados com a TKE assim (Bougeault & Lacarrere , 1989):

$$K_m = C_k l_k e^{1/2}, K_h = \alpha_T K_m, K_e = \alpha_e K_m \quad \text{EQ 70}$$

Onde,  $C_k$  é um coeficiente numérico,  $K_e$  é o coeficiente de mistura para a TKE,  $l_k$  é a longitude característica para os turbilhões presentes na atmosfera,  $\alpha_T$  e  $\alpha_e$  são os números turbulentos inversos de Prandtl (ambos com valor =1) e  $\gamma_{cg}$  é a constante de correção do fluxo contra gradiente o qual só é aplicado para a camada convectiva (Bougeault & Lacarrere , 1989).

A dissipação da TKE é estimada assim (Bougeault & Lacarrere , 1989):

$$\epsilon = C_\epsilon e^{3/2} / l_\epsilon \quad \text{EQ 71}$$

Onde  $C_\epsilon$  é um coeficiente numérico (=1) e  $l_\epsilon$  é a escala de comprimento característica dos turbilhões na CLA.

A inclusão da equação prognóstico da TKE no modelo de escala meso-beta tem como objetivo melhorar os valores modelados da intensidade turbulenta em regiões onde o fluxo de ar passa por acima de orografia pronunciada (por exemplo ventos de montanha e sistemas de ventos locais) (Bougeault & Lacarrere , 1989).

Para incluir o esquema de turbulência no modelo de escala meso-beta (fenômenos meteorológicos com uma dimensão horizontal que vai dos 20 aos 200 km e sua dimensão temporal vai de 30 minutos a 6 horas como por exemplo os ventos de montanha, sistemas de ventos locais, etc.) para representar casos não homogêneos, é necessário incluir na EQUAÇÃO 68 os termos que representam a advecção e produção pelo cisalhamento horizontal do vento devido à orografia do domínio modelado (Bougeault & Lacarrere , 1989):

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} = -U \frac{\partial \epsilon}{\partial x} - \sigma \frac{\partial \epsilon}{\partial \sigma} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} \rho \overline{w' e'} - \overline{u' w'} \frac{\partial U}{\partial z} - \overline{v' w'} \frac{\partial V}{\partial z} + \beta \overline{w' \theta'} - \epsilon \quad \text{EQ 72}$$

Aqui  $\sigma$  é a coordenada sigma a qual é calculada dividindo a pressão da camada do modelo com a pressão na camada superficial ( $p/p_s$ ),  $U$  é a velocidade horizontal do vento,  $\frac{\partial \epsilon}{\partial x}$  é a mudança da TKE na horizontal e  $\frac{\partial \epsilon}{\partial \sigma}$  é a mudança da TKE nos diferentes níveis de pressão no modelo (Bougeault & Lacarrere , 1989).

A altura da CLA neste esquema é calculada como a altura onde a TKE chega a um valor de 0,005  $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$  (Banks, et al., 2016).

### 3.2.2.3.6. Esquema da Universidade de Washington (UW)

O esquema UW (bl\_pbl\_physics = 6) conta com uma hipótese de fechamento local cujo objetivo principal é melhorar o tratamento físico da camada limite marinha em lugares com presença de

estrato-cumulus. As características principais desta parametrização incluem o uso de variáveis atmosféricas que tem em conta a umidade no ar, o diagnóstico da TKE para o cálculo da difusividade turbulenta e um tratamento unificado de todas as camadas turbulentas para cada coluna atmosférica modelada (Bretherton & Park, 2008).

Esta parametrização trabalha conservando as variáveis atmosféricas com a umidade específica total ( $q_t$ ) do ambiente tendo como base que esta umidade é a soma da umidade específica nas fases de vapor ( $q_v$ ), líquida ( $q_l$ ) e sólida (gelo) ( $q_i$ ) [ $q_t = q_v + q_l + q_i$ ], tem em conta o gradiente de difusão de regiões de alta para regiões de baixa concentração para o momentum, a conservação das propriedades atmosféricas escalares ao interior das camadas turbulentas com difusividade baseada no cálculo da TKE local e usa um tratamento explícito para diagnosticar a difusividade efetiva por entranhamento na borda das camadas convectivas definidas como camadas turbulentas que contém uma região central estaticamente instável (Bretherton & Park, 2008).

O esquema utiliza o gradiente de difusão de regiões de alta para regiões de baixa concentração para representar a turbulência toda. Os fluxos turbulentos das variáveis atmosféricas  $\chi$  (u, v, energia estática líquido-gelo [ $s_l$ ] e  $q_t$ ), calculados nas interfaces entre as camadas do modelo são calculados assim (Bretherton & Park, 2008):

$$\overline{w'\chi'} = -K_\chi \frac{\partial \chi}{\partial z} \quad \text{EQ 73}$$

Onde,  $K_\chi$  é o coeficiente de difusividade turbulenta para cada variável atmosférica,  $\chi$  é a variável atmosférica e  $z$  é a altitude (Bretherton & Park, 2008).

Tendo a TKE ( $e$ ) e a escala de comprimento da turbulência ( $l$ ), a difusividade turbulenta ( $K_h$ ) e a difusividade viscosa ( $K_m$ ) (calor e momentum respectivamente) são expressadas assim (Bretherton & Park, 2008):

$$K_h = l S_h e^{1/2} \quad \text{e} \quad K_m = l S_m e^{1/2} \quad \text{EQ 74}$$

É importante aclarar que  $l$  é a escala de comprimento de dissipação da TKE. A difusividade vertical é proporcional à escala do comprimento com a correção de estabilidade (correção que se faz ao

perfil do vento devido aos efeitos da estabilidade atmosférica em condições neutras)  $lS_{h,m}$ . As funções adimensionais de estabilidade para calor e momentum ( $S_h$  e  $S_m$  respectivamente) são especificadas segundo Galperin et al (1988):

$$S_h = \frac{\alpha_5}{1 + \alpha_5 G_h}$$

$$S_m = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 G_h}{(1 + \alpha_3 G_h)(1 + \alpha_4 G_h)} \quad \text{EQ 75}$$

Onde,  $G_h$  é a razão adimensional de estabilidade (restrito  $G_h < 0,0233$ ) e as constantes  $\alpha_1 = 0,5562$ ,  $\alpha_2 = -4,3640$ ,  $\alpha_3 = -34,6764$ ,  $\alpha_4 = -6,1272$  e  $\alpha_5 = 0,6986$ .

Este esquema é baseado na modelagem dos termos médios horizontais da equação da TKE (Bretherton & Park, 2008):

$$\frac{ds}{dt} = B + P_s + T_s - D \quad \text{EQ 76}$$

Onde,  $B$  é o fluxo convectivo (EQ 77),  $P_s$  é a produção de cisalhamento (EQ 81),  $D$  é a razão de dissipação da TKE (EQ 83),  $T_s$  é a convergência da soma do transporte turbulento da TKE e o trabalho da pressão (Bretherton & Park, 2008).

$$B = -K_h N^2 \quad \text{EQ 77}$$

$$N^2 = c_h \frac{ds_l}{dz} + c_q \frac{dq_l}{dz} \quad \text{EQ 78}$$

$$c_h = \sigma c_{hs} + (1 - \sigma) c_{hu} \quad \text{EQ 79}$$

$$c_q = \sigma c_{qs} + (1 - \sigma) c_{qu} \quad \text{EQ 80}$$

Aqui  $K_h$  é a difusividade turbulenta,  $\sigma$  é a fracção de nuvens e  $N^2$  é a frequência convectiva úmida ao quadrado (EQ 78) que é diagnosticado pelos gradientes verticais das variáveis conservadas da energia estática líquido-gelo ( $s_l$ ) e a umidade específica total ( $q_t$ ), geralmente calculada nas interfaces  $k - 1/2$  (Bretherton & Park, 2008).

Os coeficientes termodinâmicos  $c_{hs}$  e  $c_{qs}$  descrevem a contribuição dos dois gradientes das variáveis conservadas para  $N^2$  em um ar saturado e assim mesmo para um ar insaturado  $c_{hu}$  e  $c_{qu}$ . Segundo Schubert et al. (1979),  $c_{hs} = \alpha\beta$ ,  $c_{hu} = \alpha$ ,  $c_{qs} = L\alpha$  e  $c_{qu} = -\alpha c_p \delta$ . Onde,  $\alpha = g/s_v$  ( $g$  é a gravidade e  $s_v$  é a energia estática virtual),  $\delta = 0,608$  e  $\beta = [1 + \gamma C (1 + \delta)]/[1 + \gamma] \approx 0,5$ , onde  $C = c_p T/L \approx 0,115$  ( $c_p$  é o calor específico do ar a pressão constante,  $T$  é a temperatura de referência constante,  $L$  é calor latente de condensação) e  $\gamma = (L/c_p)\partial q^*/\partial T \approx 1,34$  (Schubert, et al., 1979).

$$P_s = K_m S^2 \quad \text{EQ 81}$$

$$S^2 = \left(\frac{\partial U}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z}\right)^2 \quad \text{EQ 82}$$

Aqui  $K_m$  a difusividade viscosa e  $S^2$  é o cisalhamento vertical ao quadrado (EQ 82).

$$D = \frac{e^{3/2}}{b_1 l} \quad \text{EQ 83}$$

Em EQ 83  $e$  é a TKE,  $b_1$  é uma constante em numérica ( $\approx 5,8$ ) e  $l$  é a escala de comprimento de dissipação da TKE (Bretherton & Park, 2008).

Esta parametrização faz um diagnóstico preliminar da extensão vertical e as características da estabilidade das camadas turbulentas em uma coluna da grade do modelo, baseado no gradiente do número de Richardson para a atmosfera úmida  $Ri = N^2/S^2$  que é calculado para os fluxos atmosféricos nas interfaces das camadas do modelo (Bretherton & Park, 2008).

No topo e no fundo das interfaces de cada camada convectiva, o esquema é baseado em Nicholls e Turton (1986) para o cálculo da razão de entranhamento ( $w_e$ ) (Bretherton & Park, 2008):

$$w_e = A \frac{w_*^3}{(g\Delta^E s_{vl}/s_{vl})(z_t - z_b)} \quad \text{EQ 84}$$

$$w_* = \left[ 2,5 \left( \frac{g}{\theta_v} \right) \int_{z_b}^{z_t} \overline{w\theta_v} dz \right]^{1/3} \quad \text{EQ 85}$$

Onde,  $w_*$  é a velocidade convectiva (Eq 85),  $z_t = z^{kt-1/2}$  e  $z_b = z^{kt-1/2}$  são as alturas do topo e o fundo das interfaces,  $\overline{w\theta_v}$  é o fluxo vertical médio da temperatura virtual,  $g$  é a gravidade,  $\Delta^E$  é a mudança das propriedades atmosféricas a través das interfaces de entranhamento (definida como a diferença entre os valores da grade por acima e por baixo da interface),  $s_{vl}$  é a energia estática virtual úmida [ $s_{vl} = s/(1 + 0,608q_i)$ ] que é igual à energia estática virtual no ar insaturado e  $A$  é a eficiência do entranhamento (parâmetro adimensional) que é afetada pelo resfriamento evaporativo nas misturas de ar no topo das nuvens. Na camada de mistura este resfriamento promove um afundamento daquelas misturas na camada convectiva, aumentando o entranhamento. Na base desta camada, as misturas resfriadas de ar tendem a se afundar na camada de mistura e o entranhamento não muda. Assim tem-se que (Bretherton & Park, 2008):

$$A \begin{cases} a_1(1 + a_2 E), & \text{Topo da camada de mistura} \\ a_1, & \text{Base da camada de mistura} \end{cases} \quad \text{EQ 86}$$

Para calcular a eficiência do entranhamento em uma camada de mistura seca  $a_1 = 0,2$  e  $a_2 = 15$  e  $E$  é um fator que melhora a simulação da evaporação que acontece no entranhamento na parametrização (Grenier & Bretherton, 2001):

$$E = a_3 L q_t^{kt} / (s_{vl}^{kt-2} - s_{vl}^{kt}) \quad \text{EQ 87}$$

Aqui  $a_3$  é uma constante numérica (0,8),  $L$  é o calor latente de vaporização,  $q_t^{kt}$  é a umidade total no nível  $kt$  (topo da camada de mistura) e  $s_{vl}$  é a mudança da energia estática virtual úmida no topo da camada de mistura ( $kt$ ) e o fundo desta ( $kt - 2$ ) (Bretherton & Park, 2008).

Nesta parametrização, para as camadas convectivas, o termo de fonte do transporte da TKE é modelado como a relaxação do fluxo médio da TKE (Bretherton & Park, 2008):



$$T_e = a_e(\langle e \rangle - e)e^{1/2}/l \quad \text{EQ 88}$$

Onde,  $a_e$  é a taxa de relaxação da TKE (parâmetro adimensional) (para camadas convectivas  $a_e = 1$ ),  $\langle e \rangle$  é o fluxo médio da TKE a través da profundidade da CLA,  $e$  é o valor instantâneo da TKE,  $e^{1/2}/l$  é a escala de tempo que demora um turbilhão na CLA para dar uma volta completa e se dissipar em turbilhões menores. Este termo ( $T_e$ ) é 0 acima da CLA (Bretherton & Park, 2008).

### 3.2.2.3.7. Esquema TEMF (Total Energy–Mass Flux)

O esquema TEMF (bl\_pbl\_physics = 7) é o resultado da fusão de esforços e pesquisas anteriores e conta com uma hipótese de fechamento não local. Este tem melhoras e refinação no esquema da difusividade do fluxo mássico ocasionado pelos turbilhões presentes na CLA e na simulação dos perfis das propriedades atmosféricas mais realistas para condições de cumulus superficiais ou cumulus humilis (Banks, et al., 2016).

A mistura vertical nesta parametrização é feito por dois métodos: difusividade turbulenta e fluxo de massa. A difusividade turbulenta é calculada pela energia total turbulenta (E), que é a soma da TKE e a energia potencial turbulenta, e a escala de comprimento (Angevine, et al., 2010).

Quando o fluxo de calor superficial neste esquema é positivo a parte deste de fluxo de massa é ativado. Térmicas por embaixo da camada das nuvens e fluxos ascendentes nesta são representados por um fluxo ascendente único que é inicializado no primeiro nível do modelo (igual a  $z_0$ ). O fluxo de massa ascendente em  $z_0$  é proporcional à escala de velocidade convectiva  $w_*$  (Angevine, et al., 2010).

A grade vertical escalonada utilizada nesta parametrização, segundo (Mauritsen, et al., 2007), é apresentada na FIGURA 8. O nível  $z_0$  é o primeiro nível de massa que contem  $U$ ,  $V$  e  $\theta$  onde  $U$  e  $V$  são assumidos iguais a zero,  $M$  é o número de níveis de massa,  $z_m$  são os níveis de massa e  $z_t$  são os níveis de turbulência (localizados entre os níveis de massa).

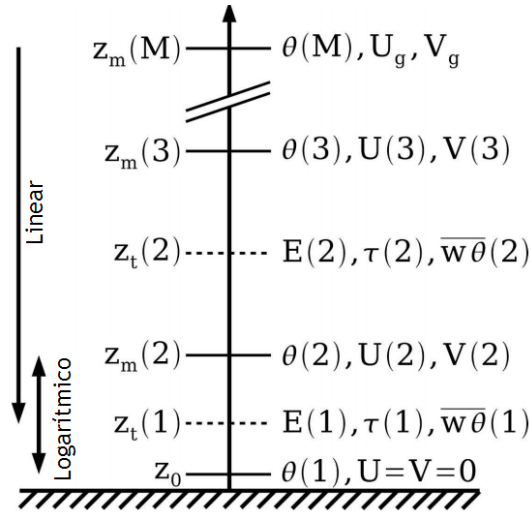


FIGURA 8: Grade utilizada pelo esquema físico da CLA “TEMF” do modelo WRF. Fonte: (Mauritsen, et al., 2007)

Aqui são aplicadas diferenças lineais simples para calcular os gradientes das propriedades atmosféricas em todo lugar da grade menos entre a camada superficial e o primeiro nível de massa, onde são aplicadas aproximações logarítmicas; isto é baixo da suposição que  $z_m(2) / z_0 \gg 1$  (Arya 1991).

O fluxo turbulento de uma variável atmosférica ( $\psi$ ) no fluxo de massa e a difusão neste esquema é representado assim (Angevine, et al., 2010):

$$\overline{w'\psi'} = -K \frac{\partial \psi}{\partial z} + M(\psi_u - \psi) \quad \text{EQ 89}$$

Onde,  $\psi$  é a energia potencial da água líquida  $\theta$ , a umidade específica total  $q_t$ , os componentes do vento  $u$ ,  $v$  ou a energia turbulenta total  $E$ ;  $K$  é a difusividade turbulenta e  $M$  é o fluxo mássico. O subscrito  $u$  denota propriedades do fluxo ascendente e as variáveis sem o subscrito  $u$  representam as propriedades do ambiente. As propriedades do fluxo ascendente evoluem na CLA segundo a seguinte equação (Angevine, et al., 2010):

$$\frac{\partial \psi_u}{\partial z} = -\varepsilon(\psi_u - \psi) \quad \text{EQ 90}$$

Em EQ 90  $\varepsilon$  é a razão fraccionada de entranhamento lateral que é constante com a altura. As propriedades do fluxo ascendente são inicializadas no primeiro nível de massa  $z_m(1) = z_0$  com os valores do ambiente nesse nível, o que reduz a dependência da resolução vertical do esquema.

A velocidade do fluxo ascendente, inicializado em  $z_m(1)$ , é expressada assim (Angevine, et al., 2010):

$$w_u = 0,5w_* \quad \text{EQ 91}$$

Onde,  $w_*$  é a velocidade convectiva.

Em todos os cálculos desta parametrização, exceto no cálculo do topo da térmica seca, o empuxo e a temperatura potencial virtual são calculados incluindo a água líquida e o seu processo de condensação (Angevine, et al., 2010).

A diferença com outros esquemas, o TEMF utiliza a  $E$  em vez da TKE, que é a soma da TKE e a energia potencial. A equação de prognóstico para  $E$  é (Angevine, et al., 2010):

$$\frac{DE}{Dt} = \tau S - \gamma - \frac{\partial F_E}{\partial z} + B \quad \text{EQ 92}$$

$$\gamma = 0,07(E^{3/2}/l) \quad \text{EQ 93}$$

$$B = 2 \frac{g}{\theta_v} \overline{w'\theta_v'} \quad \text{EQ 94}$$

Onde,  $\tau$  é o tensor de tensão,  $S$  é o vector de cisalhamento,  $\gamma$  é a razão de dissipação (EQ 93),  $B$  é o termo da produção de convecção (EQ 94),  $F_E$  é o fluxo de energia turbulenta,  $g$  é a gravidade,  $\overline{w'\theta_v'}$  é o fluxo turbulento médio da temperatura virtual e  $\theta_v$  é a temperatura virtual (Angevine, et al., 2010).

A escala de comprimento é calculada assim (Angevine, et al., 2010):

$$\frac{1}{l} = \frac{1}{kz} + \frac{f}{C_f \sqrt{f_\tau TKE}} + \frac{N}{C_N \sqrt{f_\tau TKE}} \quad \text{EQ 95}$$

Onde,  $k$  é a difusividade turbulenta,  $z$  é a altura com respeito ao solo,  $C_f = 0,185$ ,  $C_N = 2,0$ ,  $f$  é o parâmetro de Coriolis,  $N$  é a frequência Brunt–Väisälä (Zilitinkevich & Baklanov, 2002), TKE é a energia cinética turbulenta e  $f_\tau$  é o estresse adimensional (Angevine, et al., 2010).

As difusividades turbulentas para momentum e calor são calculadas da seguinte maneira (Angevine, et al., 2010):

$$K_m = f_\tau^2 TKE^2 \left( C_\varepsilon \frac{TKE \sqrt{E}}{l} - \frac{g}{\theta_v} f_\theta \sqrt{TKE \sigma_\theta^2} \right) \quad \text{EQ 96}$$

$$K_h = \frac{2 f_\theta^2 TKE l}{C_\varepsilon \sqrt{E}} \quad \text{EQ 97}$$

Aqui e  $f_\tau$  é o estresse não dimensional, TKE é a energia cinética turbulenta,  $C_\varepsilon$  é uma constante relacionada com a razão de dissipação da turbulência [ $C_\varepsilon = f_\tau(0)^{1.5}$ ],  $l$  é a escala de comprimento,  $E$  é a energia total turbulenta,  $g$  é a gravidade,  $f_\theta$  é o fluxo de calor e  $\sigma_\theta^2$  é a variação da temperatura potencial (Angevine, et al., 2010).

As funções da estabilidade são expressadas em termos do estresse adimensional e o fluxo de calor, as quais são parametrizadas mediante informação observacional assim (Mauritsen, et al., 2007):

$$f_\tau = 0,17[0,25 + 0,75(1 + Ri)^{-1}] \quad \text{EQ 98}$$

$$f_\theta = -0,145(1 + Ri)^{-1} \quad \text{EQ 99}$$

Onde  $Ri$  é o número do Richardson. Quando  $Ri < 0$ ,  $f_\tau$  e  $f_\theta$  tomam seus valores neutrais.

Em condições convectivas (fluxo convectivo superficial  $> 0$ ), a escala de comprimento e as difusividades turbulentas são calculadas assim (Angevine, et al., 2010):

$$\frac{1}{l_{conv}} = \frac{1}{kz} + \frac{3}{k(h_d - z)} \quad \text{EQ 100}$$

$$K_{m,conv} = \frac{f_{\tau 0}^2}{C_\varepsilon} l_{conv} \sqrt{TKE} \quad \text{EQ 101}$$

$$K_{h,conv} = \text{Pr}(0)^{-1} K_{m,conv} \quad \text{EQ 102}$$

Onde,  $k$  é a difusividade turbulenta,  $z$  é a altura,  $h_d$  é altura máxima da térmica seca,  $C_\varepsilon$  é uma constante relacionada com a razão de dissipação da turbulência,  $f_\tau$  é o estresse adimensional e  $\text{Pr}$  é o número de Prandtl.

### 3.2.2.3.8. Esquema Grenier–Bretherton–McCaa (GBM)

O esquema GBM (`bl_pbl_physics = 8`), com hipótese de fechamento local, permite um tratamento mais realista para os lugares onde a CLA está coberta por estrato-cumulus (Shin & Hong, 2015).

As variáveis prognostico nesta parametrização tem os dois componentes  $u$  e  $v$  da velocidade horizontal do ar e suas variáveis termodinâmicas que são conservadas pelos processos adiabáticos reversíveis úmidos, as quais são as versões linearizadas da temperatura potencial da água líquida ( $\theta_l$ ) e a razão total de mistura total da água ( $q_t$ ) (Shin & Hong, 2015).

$$\theta_l = \theta - \frac{L}{c_p \Pi} q_l \quad \text{EQ 103}$$

$$\Pi = \left( \frac{P}{P_0} \right)^{R_d / c_p} \quad \text{EQ 104}$$

$$q_t = q_v + q_l \quad \text{EQ 105}$$

Aqui  $\theta$  é a temperatura potencial,  $P$  é a pressão,  $L$  é o calor latente de vaporização da água,  $C_p$  é o calor específico do ar,  $\Pi$  é a função do Exner,  $P_0$  é a pressão superficial de referência (1000 hPa),  $R_d$  é a constante dos gases ideais para o ar seco,  $q_l$  é o valor limite da relação de mistura de água líquida no ar e  $q_v$  é a umidade específica da água na face de vapor (Betts, 1972).

O fluxo de energia total ( $E$ ) e o fluxo de água ( $W$ ) nesta parametrização é definida como (Shin & Hong, 2015):

$$E = C_p \Pi \rho w' \theta_l' + F_r \quad \text{EQ 106}$$

$$W = \rho w' q'_t + F_p \quad \text{EQ 107}$$

Onde,  $C_p$  é o calor específico do ar,  $\Pi$  é a função do Exner,  $\rho$  é a densidade do ar,  $w'\theta'_t$  é o fluxo turbulento médio da temperatura potencial da água líquida,  $F_r$  é o fluxo radiativo,  $\overline{w'q'_t}$  é o fluxo turbulento da razão total de mistura total da água e  $F_p$  é o fluxo de precipitação.

As equações para as variáveis prognostico discretizadas verticalmente são (Shin & Hong, 2015):

$$\frac{D_h \theta_t^j}{Dt} = \frac{g}{C_p \Pi^j} \frac{\delta^j E}{\delta p} - \left( \bar{\omega} \frac{\partial \theta_j}{\partial p} \right)^j \quad \text{EQ 108}$$

$$\frac{D_h q_t^j}{Dt} = g \frac{\partial^j W}{\partial p} - \left( \bar{\omega} \frac{\partial q_t}{\partial p} \right)^j \quad \text{EQ 109}$$

$$\frac{D_h u^j}{Dt} = g \frac{\partial^j \overline{\rho w' u'}}{\partial p} + f(v^j - V_g^j) - \left( \bar{\omega} \frac{\partial u}{\partial p} \right)^j \quad \text{EQ 110}$$

$$\frac{D_h v^j}{Dt} = g \frac{\partial^j \overline{\rho w' v'}}{\partial p} - f(u^j - U_g^j) - \left( \bar{\omega} \frac{\partial v}{\partial p} \right)^j \quad \text{EQ 111}$$

A grade está verticalmente discretizada utilizando uma grade escalonada onde os valores das propriedades atmosféricas se incrementam com a altura. As variáveis prognósticas básicas são prognosticadas nos diferentes níveis de integração indexados ( $j$ ) e seus fluxos são prognosticados nos níveis intermediários ( $j + 1/2$ ). O operador das diferenças verticais  $\delta^j X$  é definido por  $X^{j+1/2} - X^{j-1/2}$ . A profundidade dos níveis de pressão para as camadas termodinâmicas é  $\delta^j p$  e a distância entre os pontos da grade é  $\delta^{j+1/2} p$ .  $D_h$  a mudança no tempo da variável atmosférica seguindo o movimento horizontal,  $D_t$  é o passo do tempo,  $g$  é a gravidade,  $C_p$  é o calor específico do ar,  $\Pi$  é a função do Exner,  $\bar{\omega}$  é a velocidade vertical média e  $U_g$  e  $V_g$  são os componentes horizontais dos ventos geostróficos (Shin & Hong, 2015).

Os fluxos turbulentos de  $\theta_t$ ,  $q_t$  e momentum dentro da CLA nos níveis intermediários da grade ( $j + 1/2$ ) são calculados usando a difusividade turbulenta  $K_h$  para as variáveis termodinâmicas conservativas e a viscosidade turbulenta  $K_m$  para os componentes horizontais da velocidade assim (Shin & Hong, 2015):

$$\overline{w'X_{h,m}'}^{j+1/2} = K_{h,m}^{j+1/2} \rho^{j+1/2} g \frac{\delta^{j+1/2} X}{\delta^{j+1/2} p} \quad \text{EQ 112}$$

Aqui  $K_{h,m}^{j+1/2}$  são a difusividade turbulenta e viscosidade turbulenta (segundo seja a variável a prognosticar) nos níveis intermediários da grade ( $j + 1/2$ ),  $\rho^{j+1/2}$  é a densidade do ar nos níveis intermediários da grade ( $j + 1/2$ ),  $g$  é a gravidade,  $\delta^{j+1/2} X$  é a distância entre os pontos da grade para cada variável atmosférica modelada  $X$  e  $\delta^{j+1/2} p$  é a distância entre os pontos da grade.

Segundo Mellor e Yamada (1982),  $K_h$  e  $K_m$  estão relacionados com a TKE ( $\text{TKE}^{j+1/2}$ ), a escala de comprimento turbulenta ( $S_h^{j+1/2}$ ) e as funções de estabilidade ( $S_m^{j+1/2}$ ) assim (Shin & Hong, 2015):

$$K_{h,m}^{j+1/2} = l^{j+1/2} \sqrt{2\text{TKE}^{j+1/2}} S_{h,m}^{j+1/2} \quad \text{EQ 113}$$

O cálculo da TKE nos diferentes níveis de fluxo neste esquema é realizado da seguinte maneira (Shin & Hong, 2015):

$$\frac{\text{TKE}_{n+1}^{j+1/2} - \text{TKE}_n^{j+1/2}}{\delta t} = \left( P_b^{j+1/2} \right)_{n+1} + \left( P_s^{j+1/2} \right)_{n+1} - D_{\text{TKE}_{n,n+1}}^{j+1/2} + T_{n+1}^{j+1/2} \quad \text{EQ 114}$$

Onde, os subscritos  $n$  e  $n+1$  indicam o passo do tempo no qual os termos são calculados,  $\delta t$  é o incremento do tempo ( $t_n - t_{n-1}$ ),  $P_b$  são as forças convectivas,  $P_s$  é a produção de cisalhamento do vento,  $D_{\text{TKE}}$  é a dissipação da TKE e  $T$  é o transporte turbulento da TKE.

Para obter perfis mais realistas da TKE na camada limite convectiva, o transporte desta é realizada usando a sua difusão (Shin & Hong, 2015):

$$K_e = \eta_{T_e} K_m \quad \text{EQ 115}$$

Onde,  $\eta_{T_e}$  é um coeficiente adimensional fixado como 5 e  $K_m$  é a viscosidade turbulenta média (média geométrica) dos níveis adjacentes de fluxo.

Para a camada convectiva, a escala turbulenta é usualmente proporcional à profundidade total da CLA, enquanto a camada limite estável pode ser muito menor. Nesta parametrização é implementada a escala de comprimento segundo Blackadar (Blackadar, 1962):

$$l = kz / (1 + kz / \lambda) \quad \text{EQ 116}$$

Onde,  $k$  é a constante de von Kármán (0,4),  $\lambda$  a escala de comprimento assintótica que é proporcional à profundidade da CLA  $z_i$  (Shin & Hong, 2015):

$$\lambda = \eta_l z_i \quad \text{com} \quad \eta_l = 0,085 \quad \text{EQ 117}$$

Para determinar o conteúdo médio de água líquida em qualquer uma camada do modelo, primeiro são determinados os perfis de  $q_t$  e  $\theta_l$  entre os pontos da grade. Uma vez feito isto, é determinado se a CLA está coberta por nuvens com a EQ 118 (Shin & Hong, 2015):

$$q_{sat}(T_i, p_i) \leq q_t^M \quad \text{EQ 118}$$

Onde,  $q_{sat}$  é a razão de mistura de saturação,  $T_i$  e  $p_i$  são a temperatura e a pressão na camada de inversão,  $q_t^M$  é a razão da umidade total no ponto mais alto da grade. Neste esquema é calculado  $q_{sat}$  acima e embaixo de cada nível de fluxo e é assumido que a razão de mistura de saturação varia linearmente entre os pontos da grade.

### 3.2.2.3.9. Esquema MRF

Este esquema conta com uma hipótese de fechamento não local e tem como objetivo simular uma estrutura diária da CLA de maneira mais real (Hong & Pan, 1996).



O MRF (bl\_pbl\_physics = 9) é baseado no esquema de difusão vertical Troen e Mahrt (1986) que expressa as equações de difusão turbulenta para as variáveis prognósticas de concentração ( $C$ ), os componentes motrizes horizontais do vento ( $u$  e  $v$ ), temperatura ( $\theta$ ) e umidade ( $q$ ) assim (Hong & Pan, 1996):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_c \left( \frac{\partial C}{\partial z} - \gamma_c \right) \right] \quad \text{EQ 119}$$

Aqui  $K_c$  é o coeficiente de difusão turbulenta,  $\frac{\partial C}{\partial z}$  é a mudança da propriedade atmosférica respeito com a altura e  $\gamma_c$  é a correção ao gradiente local que incorpora a contribuição dos grandes turbilhões no fluxo total.

O esquema de difusão não local proposto por Troen e Mahrt (1986), Holtslag et al. (1990) e Holtslag e Boville (1993) é adoptado para a difusão na camada convectiva. Acima desta camada, é aplicado o esquema de difusão local para calcular a difusão na atmosfera livre (Hong & Pan, 1996).

O coeficiente de difusão na camada convectiva é formulado assim (Hong & Pan, 1996):

$$K_{zm} = kw_s z \left( 1 - \frac{z}{h} \right)^p \quad \text{EQ 120}$$

Onde,  $k$  é a constante de Kármán (0,4),  $p$  é um expoente que tem que ver com o perfil atmosférico o qual neste caso toma o valor de 2 ou (=2),  $z$  é a altura desde a superfície do solo e  $h$  é a altura da CLA. A velocidade na camada de mistura é representada da seguinte maneira (Hong & Pan, 1996):

$$w_s = u_* \phi_m^{-1} \quad \text{EQ 121}$$

Em EQ 121  $u_*$  é a velocidade de fricção superficial e  $\phi_m$  é a função do perfil do vento avaliada no topo da camada superficial. Os termos contra gradiente para  $\theta$  e  $q$  são calculados assim (Hong & Pan, 1996):

$$\gamma_c = b \frac{\overline{(w'c')}}{w_s} \quad \text{EQ 122}$$

Onde,  $\overline{(w'c')}$  é o fluxo turbulento superficial para  $\theta$  e  $q$ , e  $b$  é o coeficiente de proporcionalidade que é determinado como 7,8.

Para satisfazer o acoplamento entre o topo da camada superficial e o fundo da CLA, são utilizadas funções de perfil do vento idênticas as da física da camada superficial. Para condições de instabilidade e condições neutras  $[(w'\theta'_v)_0 \leq 0]$  (Hong & Pan , 1996):

$$\begin{aligned} \phi_m &= \left(1 - 16 \frac{0,1h}{L}\right)^{-1/4}, \quad \text{para } u \text{ e } v, \\ \phi_t &= \left(1 - 16 \frac{0,1h}{L}\right)^{-1/2}, \quad \text{para } \theta \text{ e } q \end{aligned} \quad \text{EQ 123}$$

Enquanto para condições de estabilidade  $[(w'\theta'_v)_0 > 0]$  (Hong & Pan , 1996):

$$\phi_m = \phi_t = \left(1 + 5 \frac{0,1h}{L}\right) \quad \text{EQ 124}$$

Onde,  $h$  é a altura da CLA e  $L$  é o comprimento de Monin-Obukhov. O topo da camada superficial é estimado nesta parametrização como  $0,1h$ . A altura da CLA é calculada pelo esquema assim (Hong & Pan , 1996):

$$h = \text{Rib}_{\text{cr}} \frac{\theta_{va} |U(h)|^2}{g(\theta_v(h) - \theta_s)} \quad \text{EQ 125}$$

Aqui  $\text{Rib}_{\text{cr}}$  é o número global crítico do Richardson ( $= 0,50$ ),  $U(h)$  é a velocidade horizontal do vento em  $h$ ,  $\theta_{va}$  é a temperatura virtual potencial no nível mais baixo do modelo,  $\theta_v(h)$  é a temperatura virtual potencial em  $h$ ,  $g$  é a gravidade e  $\theta_s$  é o valor da temperatura perto da superfície (Hong & Pan , 1996):

$$\theta_s = \theta_{va} + \theta_T \left[ = b \frac{(\overline{w'\theta_v'})_g}{w_s h} \right] \quad \text{EQ 126}$$

Em EQ 126  $\theta_{va}$  é a temperatura virtual potencial no nível mais baixo do modelo e  $\theta_T$  é o excesso de temperatura virtual perto da superfície que tem um valor máximo de 3K.

Nesta parametrização, o valor da altura da CLA,  $h$ , é obtido iterativamente. Primeiro esta é estimada por EQ 125 sem ter em consideração o excesso térmico  $\theta_T$ . Esta  $h$  é utilizada para calcular as funções do perfil em EQ 123 e EQ 124 e calcular a velocidade da camada convectiva  $w_s$  em EQ 121. Utilizando  $w_s$  e  $\theta_T$  em EQ 126  $h$  é melhorada. Com esta melhorada  $h$  e  $w_s$ , é obtido  $K_{zm}$  da EQ 120. Os termos de correção contra gradiente para  $\theta$  e  $q$  em EQ 119 são obtidos da EQ 122 (Hong & Pan , 1996).

Na atmosfera livre, neste esquema, é utilizado o coeficiente de difusão turbulenta local  $K$ . Nesta parte da atmosfera, os coeficientes de difusividade vertical para o momentum ( $m$ ;  $u$ ,  $v$ ) e para a massa ( $t$ ;  $\theta$ ,  $q$ ) são representados por (Hong & Pan , 1996):

$$K_{m,t} = l^2 f_{m,t}(\text{Rig}) \left| \frac{\partial U}{\partial z} \right| \quad \text{EQ 127}$$

Onde,  $l$  é o comprimento de mistura,  $f_{m,t}(\text{Rig})$  são as funções de estabilidade e  $|\partial U / \partial z|$  é o cisalhamento vertical do vento. As funções de estabilidade  $f_{m,t}$  são representadas em termos do número do Richardson do gradiente local em um nível dado [ $\text{Rig} = (g/T)(\partial \theta_v / \partial z)(|\partial U / \partial z|^{-2})$ ]. O  $\text{Rig}$  calculado é limitado por um valor de -100 que permite prever regimes irrealisticamente instáveis. O comprimento da escala de mistura  $l$  é dado por (Hong & Pan , 1996):

$$\frac{1}{l} = \frac{1}{kz} + \frac{1}{\lambda_0} \quad \text{EQ 128}$$

Onde,  $k$  é a constante de Kármán ( $= 0,4$ ),  $z$  é a altura desde a superfície do solo e  $\lambda_0$  é a escala de comprimento assintótico ( $= 30\text{m}$ ).

As funções de estabilidade,  $f_{m,t}(\text{Rig})$  diferem para os regimes estável e instável. Para uma atmosfera livre estavelmente estratificada ( $\text{Rig} > 0$ ), é adotada a seguinte formula (Kim, 1991):

$$f_t(\text{Rig}) = e^{-8,5\text{Rig}} + \frac{0,15}{\text{Rig} + 3,0} \quad \text{EQ 129}$$

$$\text{Pr} = 1,5 + 3,08\text{Rig} \quad \text{EQ 130}$$

$$\text{Pr} = \left( \frac{\phi_t}{\phi_m} + bk \frac{0,1h}{h} \right) \quad \text{EQ 131}$$

Para uma atmosfera instavelmente estratificada ou neutra ( $\text{Rig} \leq 0$ ) é utilizada a mesma formula de estabilidade para a camada superficial (EQ 123) onde é substituído  $z/L$  por  $\text{Rig}$ . Utilizando a relação do número de Prandtl com as funções de estabilidade (EQ 131) são calculadas as funções de estabilidade para o momentum ( $u$  e  $v$ ).

### 3.2.2.3. Parametrizações da superfície terrestre (land - surface physics)

A superfície terrestre interatua com a radiação solar entrante depois da sua dispersão, reflexão e absorção na atmosfera. O balanço da energia resultante na superfície depende das características da superfície como o albedo, a quantidade de água disponível para produzir evaporação, a vegetação presente, a rugosidade, o tipo e a presença de neve (COMET, 2016).

Estas parametrizações da superfície terrestre no WRF tem em conta as parametrizações da CLS (sf\_sfclay\_physics) as quais calculam a velocidade de fricção e os coeficientes de troca que permitem o cálculo dos fluxos superficiais de calor e umidade da superfície e as parametrizações da camada superficial do solo (sf\_surface\_physics) (TABELA 5) que utilizam as forçantes radioativas do esquema de radiação, as forçantes de precipitação provenientes das parametrizações da microfísica, junto com informação interna das variáveis de estado do terreno e as suas propriedades, para proporcionar os fluxos de calor e umidade sobre o solo (incluindo o mar e regiões geladas), os quais proporcionam as condições do limite inferior para o transporte vertical feito pelas parametrizações da CLA do modelo (C. Skamarock, et al., 2008).

Estes esquemas permitem lidar melhor com os fluxos térmicos e de umidade em múltiplas camadas do solo além de permitir lidar com os efeitos de diferentes tipos de vegetação, coberturas do solo e superfícies cobertas de neve que permitem fornecer as variáveis do estado do solo como a temperatura superficial e do perfil do solo, o perfil de umidade no solo e cobertura de neve. Estes influenciam no comportamento da CLA como pode se observar na FIGURA 9 (C. Skamarock, et al., 2008).

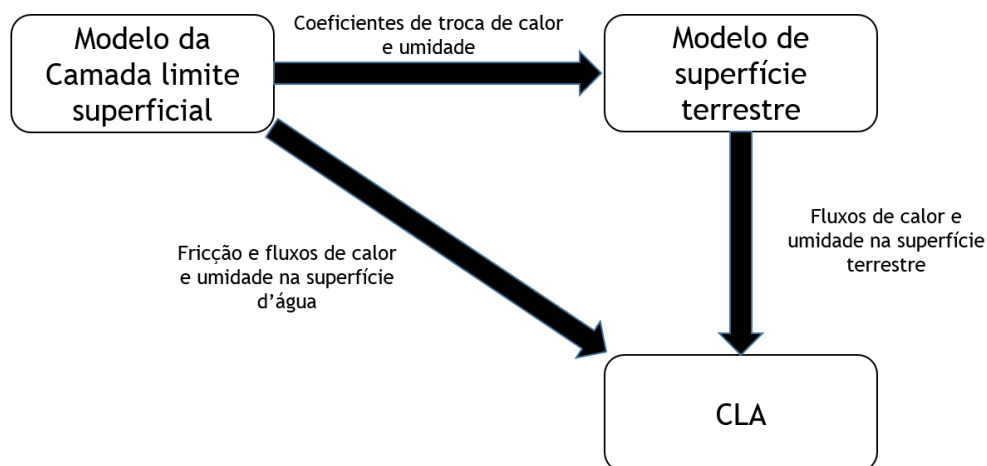


FIGURA 9: Interação entre as parametrizações físicas da superfície do modelo WRF e a sua influência na modelagem da CLA realizada pelo modelo. Fonte: Adaptado de Dudhia (2012).

Na FIGURA 10 é apresentado de uma maneira mais detalhada os processos superficiais que são parametrizados pelo modelo, onde se mostram os fluxos que ocorrem na superfície terrestre e nos corpos d'água e nas primeiras camadas do solo.

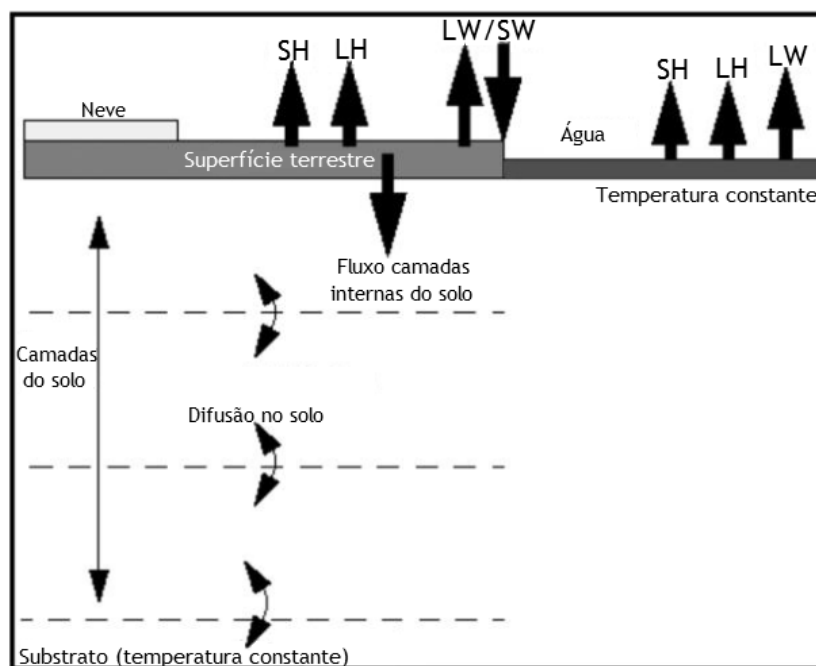


FIGURA 10: Fluxos superficiais que tem em conta as parametrizações físicas da superfície terrestre no modelo WRF onde SH e LH são os fluxos de calor latente e sensível e LW e SW são os fluxos de radiação de onda longa e curta. Fonte: Adaptado de Dudhia (2012).

#### 3.2.2.4. Parametrizações de radiação de onda curta (ra\_sw\_physics) e onda larga (ra\_lw\_physics)

Os processos de radiação, tanto de onda curta (solo) quanto de onda longa (sol), ocorrem em escalas temporais e espaciais muito pequenas e são afetados pela composição local da atmosfera (COMET, 2016).

Os esquemas de radiação proporcionam os valores do aquecimento atmosférico devido à radiação descendente de onda longa e onda curta, as quais são responsáveis pelo acúmulo de calor no solo. A radiação de onda longa inclui a radiação emitida e absorvida pela superfície terrestre e os gases presentes na atmosfera e a radiação térmica ou infravermelha. O fluxo ascendente de radiação de ondas longas que provém do solo é determinado pela emissividade da superfície e este depende de cada categoria de ocupação do solo como do perfil de temperatura deste. A radiação de onda curta inclui longitudes de onda visível e ondas com comprimento da mesma ordem de grandeza que compõem o espectro solar. A única fonte de radiação é o sol mas os processos incluem absorção, reflexão e o dispersão na atmosfera e nas superfícies (FIGURA 11). Para a radiação de ondas curtas, o fluxo ascendente é a reflexão devido ao albedo (C. Skamarock, et al., 2008).

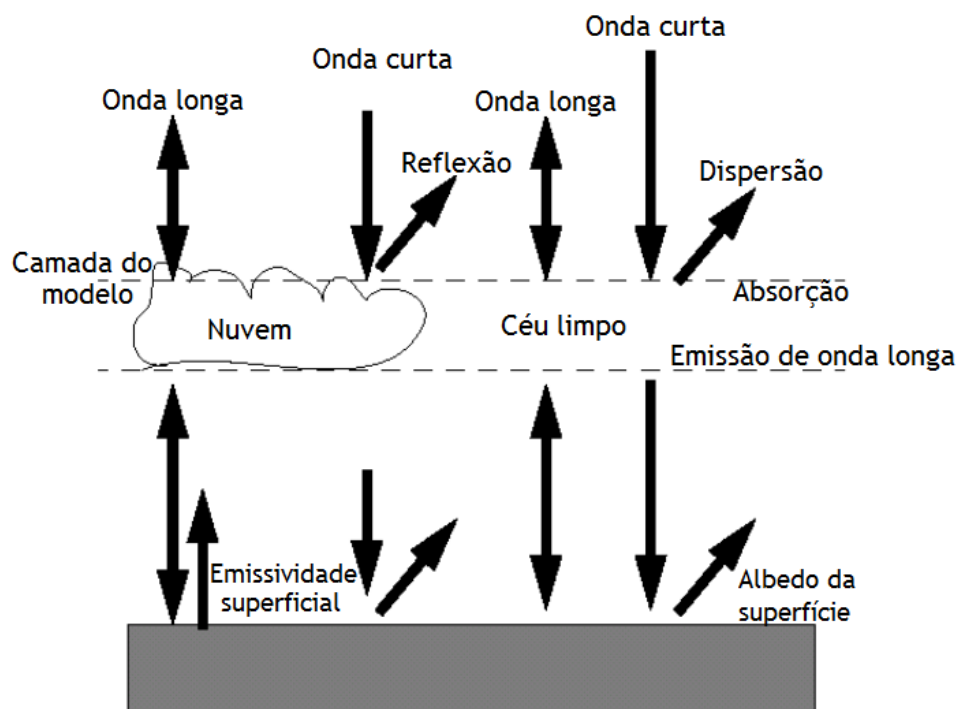


FIGURA 11: Processos radiativos presentes na atmosfera que têm em conta os esquemas de radiação no modelo meteorológico WRF. Fonte: Adaptado de Dudhia (2012).

Na atmosfera a radiação está diretamente ligada aos processos de predição de nuvens, a distribuição de vapor de água, assim como a especificação de dióxido de carbono, ozônio e opcionalmente as concentrações de gases-traço (C. Skamarock, et al., 2008).

Todos os esquemas de radiação do WRF são do tipo coluna (unidimensional), o que significa que cada coluna é tratada de forma independente e os fluxos são correspondentes a infinitos planos horizontais uniformes (C. Skamarock, et al., 2008).

## 4. METODOLOGIA

Este capítulo está dividido em 3 partes principais, as quais serão descritos os materiais e métodos utilizados para a realização deste trabalho. Na seção 4.1 são abordados os aspectos gerais da área de estudo (RMGV), a seção 4.2 apresenta uma descrição dos critérios de modelagem onde se faz uma localização e descrição dos domínios utilizados nas modelagens assim como as parametrizações utilizadas para cada uma destas e a seção 4.3 descreve o tratamento estatístico que será aplicado para os resultados do modelo WRF frente aos dados experimentais.

#### 4.1. Região de estudo

A RMGV, criada em 1995 pela Lei Complementar Estadual nº 58/95 é localizada no estado do Espírito Santo, região sudeste do Brasil, possui um área de 2.335 km<sup>2</sup> é composta municípios de Vitória, Vila Velha, Cariacica, Serra, Guarapari, Viana e Fundão (FIGURA 12) (Instituto de Pesquisa e Econômica Aplicada, 2010). É uma região onde o relevo é caracterizado por maciços rochosos, serras e morros, áreas de baixada, além de grandes planícies (FIGURA 13). A ocupação do solo é variada, apresentando grandes extensões cobertas pela mancha urbana e outras por vegetação, que é constituída por fragmentos de mata atlântica, restingas, várzeas, manguezais, vegetação rupestre, campos e pastagens (FIGURA 14) (IEMA, 2013).

Esta região é o principal polo econômico do estado, o que representa aproximadamente um 63,13% do PIB do estado; 65,55% setor terciário, 34,03% do setor secundário e 0,042% do setor primário da economia. Encontram-se atividades de siderurgia, pelletização, mineração, cimenteiras, indústria alimentícia, etc. (Instituto Jones dos Santos Neves (IJSN), 2008)

A população da RMGV é aproximadamente de 1.884.096 habitantes (IBGE ,2014) que representa 48% da população total do estado do Espírito Santo, 98% da qual vivem em região urbana. Cerca de 24,5% da população vive em Vila Velha, 24% na Serra, 22% em Cariacica, 19% em Vitória e os outros 10.5% da população vivem em Guarapari, Viana e Fundão (IEMA, 2013).

Localizada entre os paralelos 10° e 23°26' S, na zona tropical, sofre a influência tanto de sistemas tropicais como de latitudes medias tendo assim uma estação seca bem definida no inverno e estação chuvosa de verão com chuvas convectivas. Essa região possui uma característica climática diversificada devido a sua topografia e a aspectos dinâmicos da atmosfera que incluem os sistemas meteorológicos de micro, meso e macro escalas e que atuam direta ou indiretamente no regime pluvial (Boligon Minuzzi, et al., 2007).



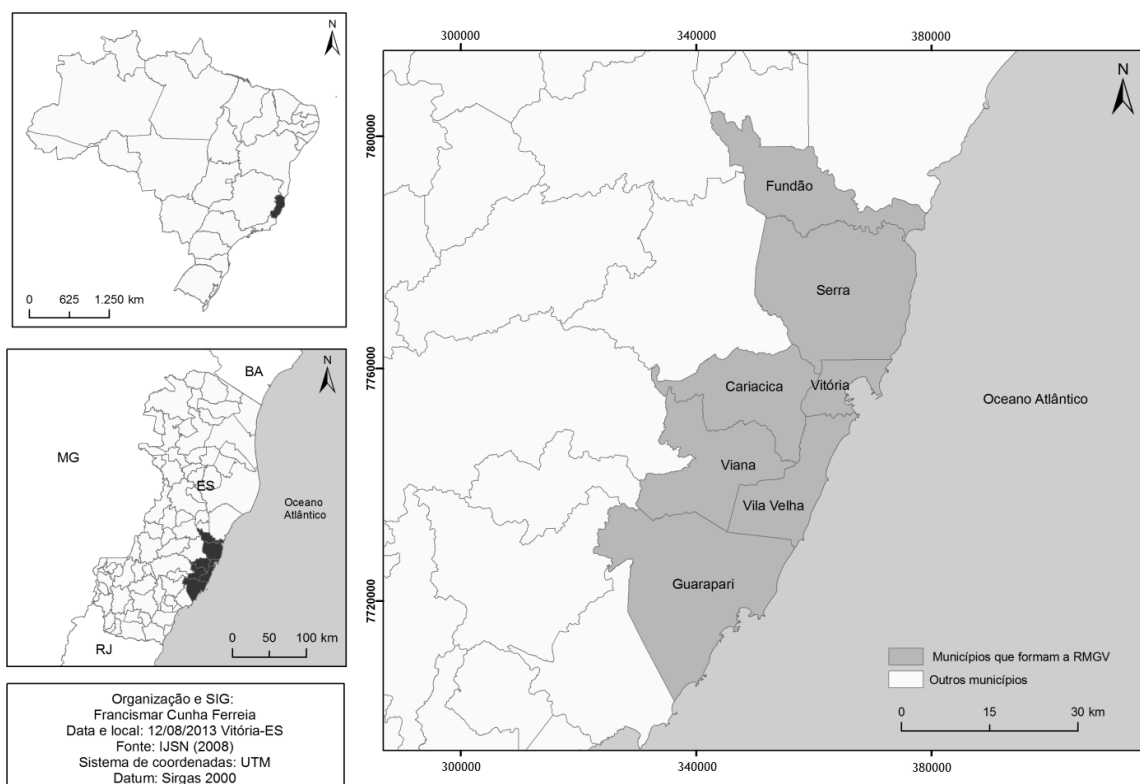


FIGURA 12: Localização e divisão política da RMGV-ES, Brasil. Fonte: Adaptado de (Ferreira, 2014).

Os ventos nesta região tem uma direção predominante nordeste (NE), o que favorece o transporte de umidade do oceano Atlântico Equatorial para o ramo oceânico da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). O regime de vento na RMGV é influenciado por circulações de vento locais como brisas marinhas e terrestres (devido à proximidade com o oceano) e brisas de vale e montanha (devido à topografia acidentada). Os principais fenômenos meteorológicos que influenciam a variabilidade do tempo nesta região são a ZCAS, Sistemas frontais e o Anticiclone do Atlântico Sul (ASAS) (IEMA, 2013).

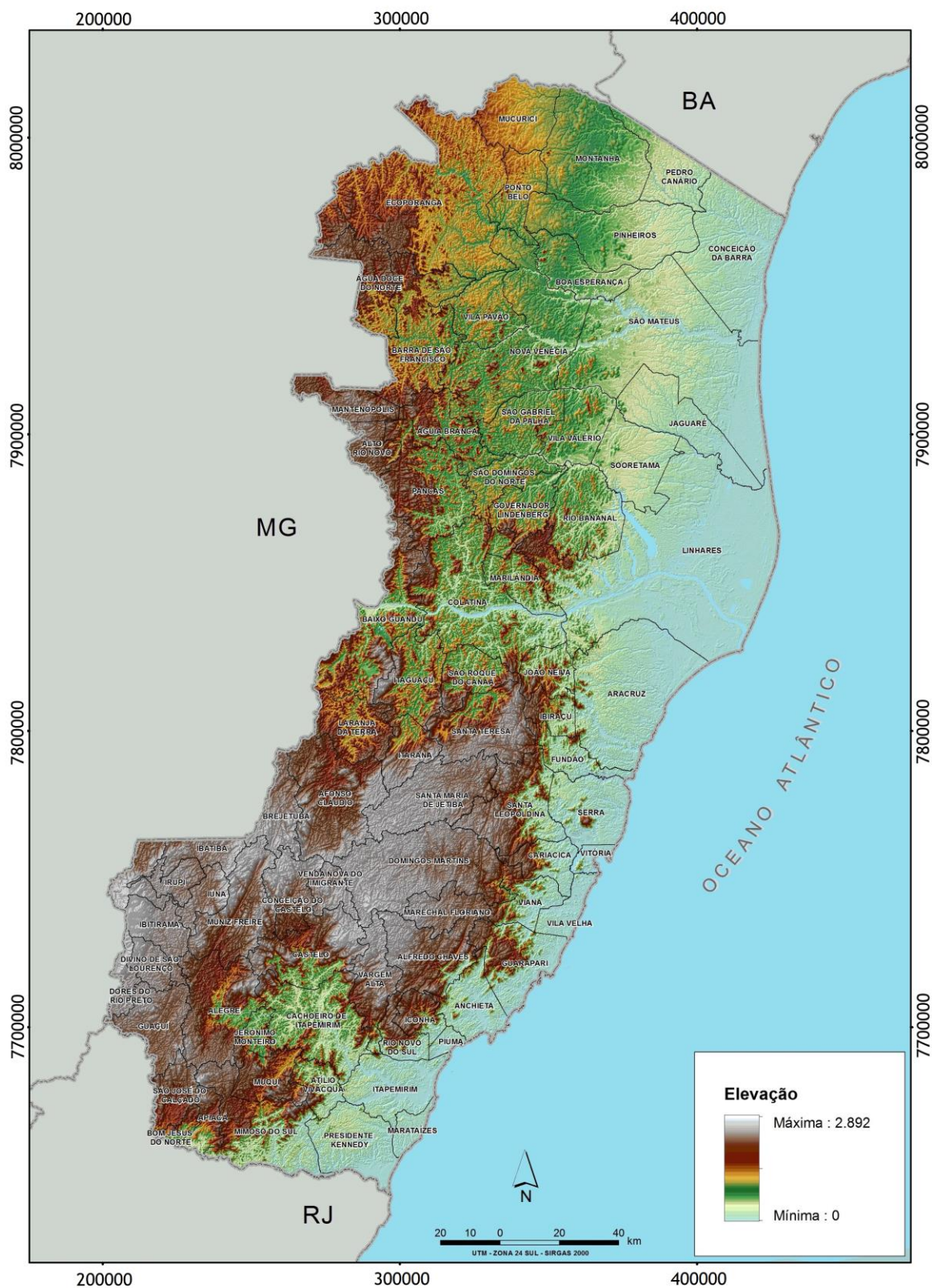


FIGURA 13:Modelo Digital de Elevação Espírito Santo. Fonte:(Instituto Jones dos Santos Neves, 2011)



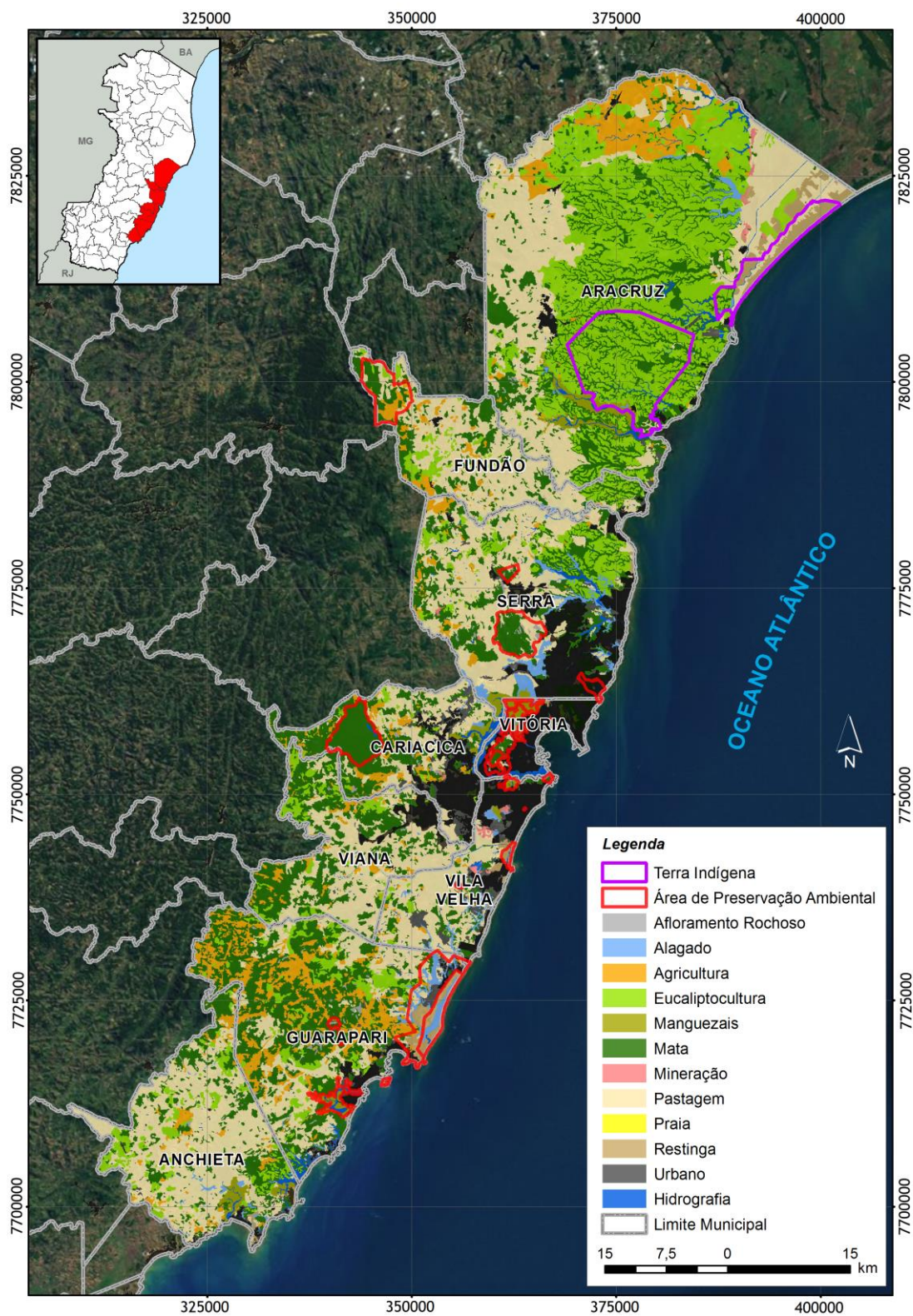


FIGURA 14: Usos e ocupações da terra na RMGV 2010. Fonte: (Revista franco-brasileira de geografia, 2014).

## 4.2. Modelagem meteorológica com o modelo WRF 3.6.1

As diferentes modelagens meteorológicas foram realizadas para os meses de fevereiro e julho de 2010. Estes meses foram selecionados com o objetivo de representar e avaliar o desempenho do modelo WRF 3.6.1 durante dois meses que possuem uma variação sazonal significativa na região, inverno (julho) e verão (fevereiro).

Nestas simulações foram utilizados dois domínios aninhados (FIGURA 15) onde o domínio maior (d01) tem uma resolução espacial de 5 km, formando um domínio de 245 x 245 km com 49 x 49 células que cobre todo o estado do Espírito Santo, parte do Minas Gerais, Rio de Janeiro e Bahia. O domínio menor (d02) tem uma resolução espacial de 1 km formando um domínio de 120 x 120 km com 120 x 120 células que compreende toda a RMGV; ambos centrados nas coordenadas -20,25°S e 40,29°W. A estrutura vertical para ambos os domínios foi representada por 21 camadas verticais que correspondem aos níveis sigma de 1.000, 0.9975, 0.995, 0.992, 0.988, 0.982, 0.976, 0.970, 0.950, 0.930, 0.870, 0.800, 0.740, 0.630, 0.540, 0.450, 0.360, 0.270, 0.180, 0.090 e 0.000.

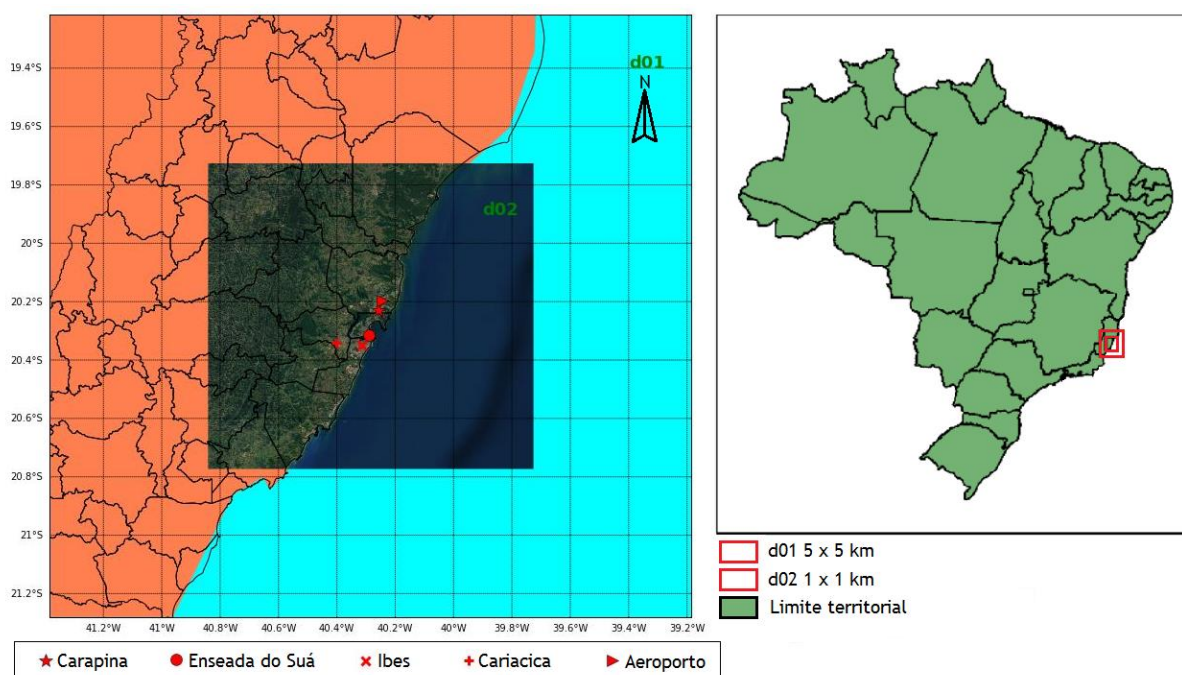


FIGURA 15: Configuração dos domínios utilizados para as simulações no WRF.

O modelo precisa de uma série de dados de entrada para que a modelagem tenha uma boa acurácia. Os dados topográficos e do uso e ocupação do solo são os dados disponibilizados pelo *U.S Geological Suvery* (USGS) com uma resolução de 30'' para ambos domínios. Os dados que provem as condições iniciais do modelo foram adquiridos do *National Center for Environmental Prediction* (NCEP) Global Forecast System (GFS) os quais tem uma resolução horizontal de 0,5 x 0,5° e uma resolução temporal de 6 horas. Estes dados estão disponíveis gratuitamente no site <http://rda.ucar.edu/datasets/ds335.0/index.html#sfol-wl-/data/ds335.0?g=9>.

#### **4.2.1. Parametrizações utilizadas nas modelagens**

Devido às condições topográficas, posição geográfica, proximidade com o mar e as circulações de microescala, as variáveis de velocidade e direção do vento que são fundamentais para a dispersão dos poluentes atmosféricos e, portanto para a avaliação da qualidade do ar em uma região, apresentam uma variação ao longo do ano na RMGV que torna esta em uma área complexa para modelar (Pedruzzi, 2016; Santiago, 2015).

Tendo como objetivo melhorar as modelagens das variáveis meteorológicas anteriormente mencionadas, foram realizadas 17 simulações para os períodos de verão (02/2010) e inverno (07/2010) variando as parametrizações da CLA e as parametrizações da CLS que influenciam diretamente na modelagem das variáveis meteorológicas na CLA; deixando as outras parametrizações com os esquemas com que se tem trabalhado em pesquisas anteriores do grupo de pesquisa de recursos atmosféricos da universidade como as de Pedruzzi, 2016 e Santiago, 2015 que apresentaram um bom desempenho nas modelagens. A TABELA 2 apresenta o resumo das parametrizações empregadas nas modelagens meteorológicas no modelo WRF, as quais são iguais tanto para verão quanto para inverno.

TABELA 2: Resumo das parametrizações empregadas nas modelagens realizadas com o WRF 3.6.1

Modelagem	CLA	CLS	Microfísica <sup>1</sup>	Radiação (SW)	Radiação (LW)	Superfície terrestre	Cumulus
M_1	YSU	MM5 melhorado	Thompson	Dudhia	RRTM	Noah	Betts– Miller– Janjic
M_2	YSU	MM5					
M_3	MYJ	Eta					
M_4	NCEP	NCEP					
M_5	ACM2	MM5 melhorado					
M_6	ACM2	MM5					
M_7	Boulac	MM5 melhorado					
M_8	Boulac	Eta					
M_9	Boulac	MM5					
M_10	UW	MM5 melhorado					
M_11	UW	Eta					
M_12	UW	MM5					
M_13	TEMF	TEMF					
M_14	GBM	MM5 melhorado					
M_15	GBM	MM5					
M_16	MRF	MM5 melhorado					
M_17	MRF	MM5					

<sup>1</sup>A parametrização para a microfísica muda para o domínio 2 na qual é utilizada a parametrização “WRF Single–moment 6–class”

\*Tanto para a estação de verão quanto para a de inverno foram utilizadas as mesmas parametrizações

### 4.3. Análise e avaliação de desempenho dos dados modelados pelo WRF

Os modelos numéricos como o WRF que são considerados seguros e que têm um comportamento bem estudado, estruturado e caracterizado, envolvem uma série de características e requerimentos que estão relacionados ao lugar onde foi desenvolvido. Estas características inerentes do modelo podem ocasionar um funcionamento pouco satisfatório em uma região como a RMGV devido a que as condições de clima, circulações locais devido às características do terreno, ocupação do solo, etc., são diferentes e não estão representados perfeitamente no modelo.

Graças ao desenvolvimento tecnológico e as novas técnicas e linguagens de programação, os modelos como o WRF e demais modelos focados em outras ramas da ciência são cada vez mais eficientes e próximos à realidade; mas além sejam cada dia melhores, os resultados entregados por estes não são ainda totalmente precisos (Prabha & Hoogenboom, 2008).

Devido a esta série de limitações do modelo e seus componentes, os resultados obtidos para as diferentes simulações realizadas com este para as diferentes estações pertencentes a RAMQAr e o aeroporto devem ser verificados comparando-os com valores reais medidos nestas estações meteorológicas, das quais só as estações da Enseada do Suá, Ibes, Cariacica, aeroporto e Carapina (TABELA 3) tem medição de variáveis meteorológicas. A localização espacial destas estações pode ser observada na FIGURA 16.

TABELA 3: Parâmetros meteorológicos monitorados pelas estações pertencentes a RAMQAr e o aeroporto. Fonte: IEMA, 2014.

<b>Estação</b>	<b>Meteorologia</b>
Laranjeiras	-
Carapina	DV, VV, UR, PP, P, T, I
Jardim Camburi	-
Enseada do Suá	DV, VV
Vitória-centro	-
Ibes	DV, VV
Vila Velha	-
Cariacica	DV, VV, T, UR
Aeroporto	DV, VV, T, $\theta$

DV = Direção do Vento, VV = Velocidade do Vento, UR = umidade Relativa, PP = Precipitação Pluviométrica, P = Pressão, T = Temperatura,  $\theta$  = Temperatura potencial e I = Insolação.

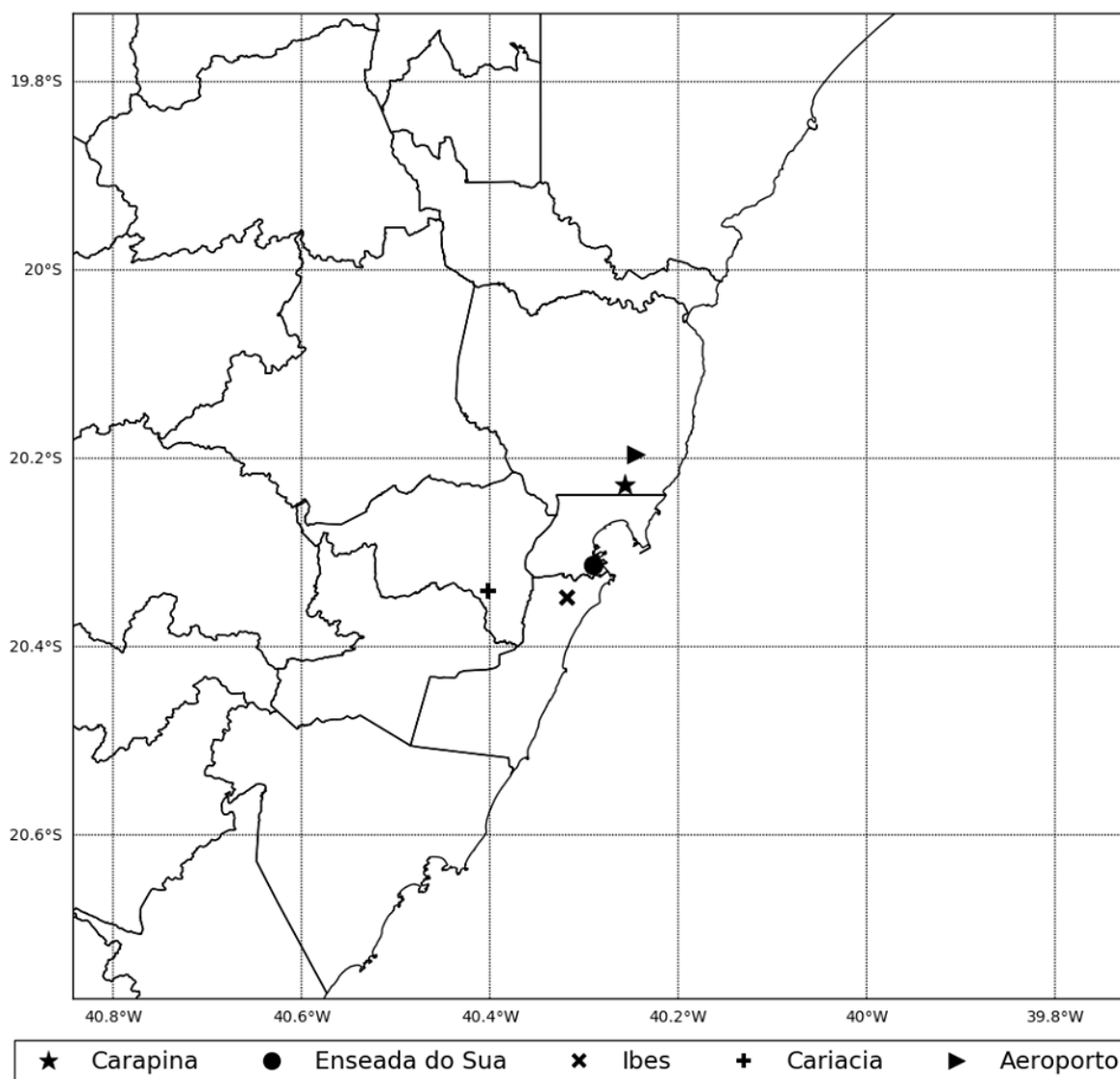


FIGURA 16: Estações pertencentes a RAMQAr as quais medem dados meteorológicos.

Para ter a garantia de que o modelo é eficiente e preciso, devem ser aplicados alguns parâmetros estatísticos com o fim de poder fazer uma comparação eficiente entre os dados simulados pelo modelo WRF e os dados meteorológicos reais medidos nas diferentes estações de medição da RMGV.

Existem metodologias que permitem avaliar os resultados como a proposta por Emery, et al. (2001), quem sugeriu uns valores de referência ou indicadores para a avaliação dos resultados das modelagens para as variáveis meteorológicas de temperatura (2 m), velocidade e direção do vento (10 m), os quais são apresentados na TABELA 4.



TABELA 4: Valores dos indicadores estatísticos propostos pelo Emery, et al., 2001 para as variáveis meteorológicas avaliadas. Fonte: (Emery, et al., 2001)

Variável meteorológica [unidade]	Estatística	Indicador
Velocidade do vento [m/s] (10 m)	MB	$\pm 0,5$
	RMSE	$\leq 2,0$
	IOA	$\geq 0,6$
Direção do vento [°] (10 m)	MB	$\pm 10$
	MAGE	$\leq 30$
Temperatura [K] (2 m)	MB	$\pm 0,5$
	MAGE	$\leq 2,0$
	IOA	$\geq 0,8$

Cada indicador estatístico mostrado anteriormente apresenta uma relação entre os dados simulados ( $\Phi_i$ ) e os dados observados ( $\Phi_{iobs}$ ), onde N é o número de valores analisados e  $O_{mean}$  é a média das observações. A continuação são apresentados cada um dos índices estatísticos utilizados para fazer a avaliação do desempenho do modelo WRF para simular os valores reais medidos das diferentes variáveis meteorológicas anteriormente mencionadas por cada uma das estações pertencentes a RAMQAr e o aeroporto.

➤ **Viés médio (*Mean Bias* - MB)**

O MB avalia o comportamento dos valores simulados e os observados, onde um valor positivo indica uma superestimação dos dados simulados e um valor negativo indica uma subestimação nos dados simulados; em comparação com os dados medidos. Para o cálculo deste estatístico é utilizada a seguinte equação:

$$MB = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Phi_i - \Phi_{iobs}) \quad \text{EQ 132}$$

➤ **Raiz do Erro Médio Quadrático (*Root Mean Square Error - RMSE*)**

O *RMSE* representa a raiz quadrada do erro médio quadrático. Este permite obter a medida quadrática das diferenças entre os pares de dados simulados e os observados. A maneira de calcular este estatístico é assim:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(\phi_i - \phi_{iobs})^2}{N}} \quad \text{EQ 133}$$

➤ **Índice de concordância (*Index of Agreement - IOA*)**

O *IOA* serve como uma medida normalizada do grau de erro de previsão do modelo e seu valor varia entre 0 e 1. Um valor de 1 significa que os valores modelados tem uma concordância perfeita com os valores observados e um valor de 0 indica que não tem concordância nenhuma entre os valores simulados e os observados. O cálculo deste índice é feito assim:

$$IOA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\phi_i - \phi_{iobs})^2}{\sum_{i=1}^N (|\phi_i - o_{mean}| + |\phi_{iobs} - o_{mean}|)^2} \quad \text{EQ 134}$$

Este estatístico é uma medida da coincidência do desvio de cada valor modelado com respeito à média observada e o desvio de cada valor observado com respeito à média observada valor modelado com respeito à média observada (Emery, et al., 2001).

➤ **Erro Médio Absoluto (*Mean Absolute Gross Error - MAGE*)**

O *MAGE* é utilizado para calcular incerteza ou o erro médio que tem entre os valores simulados e os observados. Para calcular este estatístico é utilizada a seguinte equação:

$$MAGE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\Phi_i - \Phi_{iobs}| \quad \text{EQ 135}$$

➤ **Coefficiente de correlação do Pearson ( $r$ )**

O  $r$  mostra a relação de linearidade que tem os dados simulados com os dados observados. Este coeficiente é medido em uma escala que vai de -1 a 1 e o cálculo deste é assim:

$$r = \left[ \frac{\text{Covariância entre } \Phi_{iobs} \text{ e } \Phi_i}{(\text{desvio padrão de } \Phi_i)(\text{desvio padrão de } \Phi_{iobs})} \right] \quad \text{EQ 136}$$

O resultado deste estatístico é interpretado assim (TABELA 5):

TABELA 5: Valores do coeficiente de Pearson. Fonte: (Nieves Hurtado & Domínguez Sánchez, 2010).

Valor do “r”	Grau de correlação entre as variáveis
- 1	Negativa perfeita
- 1 < r ≤ - 0,8	Negativa forte
- 0,8 < r < - 0,5	Negativa moderada
- 0,5 ≤ r < 0	Negativa fraca
0	Não existe correlação
0 < r ≤ 0,5	Positiva fraca
0,5 < r < 0,8	Positiva moderada
0,8 ≤ r < 1	Positiva forte
1	Positiva perfeita

Os valores positivos e negativos só indicam se o valor da variável modelada aumenta ou diminui com respeito à variável observada (Tecnológico de Monterrey, 2016).

De acordo com a metodologia de (Zhang, et al., 2014), o MB, o RMSE e o MAGE são as medidas estatísticas mais utilizadas para avaliar as variáveis meteorológicas modeladas com as observadas, as quais devem estar entre os valores dos índices apresentados na TABELA 4. Embora, a Agencia

de Proteção do Meio Ambiente dos Estados Unidos (USEPA) no documento “*Modeling Guidance for Demonstrating Attainment of Air Quality Goals for Ozone, PM<sub>2.5</sub>, and Regional Haze*” (USEPA, 2014), não recomenda o uso destes índices como critério de “passou/falhou” para a validação de modelos meteorológicos, mas fala que estes índices estatísticos servem como medida que permite analisar a confiabilidade geral do modelo. Resultados estatísticos fora das faixas estabelecidas indicam que os resultados devem ser examinados com mais cuidado. Diversos autores que avaliaram o desempenho de modelos meteorológicos como o WRF, propõem faixas de variação superiores aos valores estabelecidos (TABELA 6). Assim, os gráficos de desempenho apresentados no presente documento incluem estas faixas de variação dos indicadores estatísticos estabelecidos originalmente por Emery et al (2001) (TABELA 4) e a faixa de variação dos parâmetros estatísticos reportados para as simulações realizadas por Emery (2001), Borge et al. (2008), Reboredo et al. (2014) e Zhang et al. (2014).

TABELA 6: Faixas de variação dos parâmetros estatísticos usados para a avaliação do modelo meteorológico WRF encontrados pelos autores Emery et al (2001), Borge et al. (2008), Reboredo et al. (2014) e Zhang et al. (2014).

Descrição	Velocidade do vento		Direção do vento	
	MB [m/s]	RMSE [m/s]	MB [°]	MAGE [°]
Faixa de resultados obtido por Emery et al (2001)	-0,40 a 1,75	1,49 a 2,50	-18,73 a 20,08	20,57 a 88,64
Faixa de resultados obtidos por Borge et al. (2008)	-0,59 a 0,59	1,94 a 3,79	-38,33 a -7,94	55,91 a 85,46
Faixa de resultados obtidos por Reboredo et al. (2014)	-0,60 a 1,13	1,58 a 2,53	-13,40 a 0,60	57,24 a 75,97
Faixa de resultados obtidos por Zhang et al. (2014)	-0,9 a 0,9	1,5 a 3,0	-14 a 15	0 a 61

Desta maneira, as modelagens realizadas com as diferentes parametrizações da CLA e suas respectivas parametrizações da CLS disponíveis no modelo WRF versão 3.6.1 foram avaliadas primeiro segundo os valores propostos por Emery et al. 2001. As demais faixas de variação escolhidas nesta dissertação (para velocidade do vento MB entre -0,60 e 1,75 e RMSE entre 1,49 e 3,79 e para direção do vento MB entre -38,33 e 20,08 e MAGE entre 0 e 88,64) serão tidas em

conta como segundo critério de avaliação para ver que tão fora de fase ou exatos estão os valores modelados dos valores observados.

Devido a que estas variações ainda não foram feitas para a temperatura, a avaliação desta só será feita com os valores dos índices propostos para esta variável pelo Emery et al. (2001).

## 5. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos para as simulações numéricas realizadas com as diferentes parametrizações para a CLA, e suas respectivas parametrizações da CLS, disponíveis no modelo WRF versão 3.6.1. Este está dividido em duas partes, onde a primeira (5.1) apresenta a comparação entre os dados modelados da velocidade e direção do vento a 10 m e a temperatura a 2 m para o período do verão (02/2010) e a segunda (5.2) apresenta a comparação entre os dados modelados destas mesmas variáveis meteorológicas para o período do inverno (07/2010).

Para cada uma das estações pertencentes à RAMQAr que apresentam medição de variáveis meteorológicas e para a do aeroporto (TABELA 3) são apresentados uma série de gráficos “soccer goal” (gol de futebol) mensais os quais avaliam o desempenho do modelo WRF representando as variáveis meteorológicas anteriormente mencionadas. Esta avaliação foi baseada em alguns testes estatísticos sugeridos pela US-EPA em seu documento “Modeling Guidance for Demonstrating Attainment of Air Quality Goals for Ozone, PM<sub>2.5</sub>, and Regional Haze”, (EPA, 2014). Nestes gráficos o “alvo” é definido pelos valores dos indicadores estatísticos propostos pelo Emery et. al (2001). A meta nestes gráficos são manter os valores do MB, RMSE e MAGE, para a temperatura do ar, a velocidade e direção do vento dentro do alvo estabelecido. Além dos limites estatísticos originalmente propostos por Emery et al (2001) (TABELA 4) (polígono verde), para a velocidade e direção do vento, são incluídos nestes gráficos as faixas de variação dos parâmetros estatísticos reportados para as simulações realizadas por Emery et al (2001), Borge et al. (2008), Reboredo et al. (2014) e Zhang et al. (2014) (polígono vermelho) apresentados na TABELA 6 na subseção 4.3 do presente documento. Devido ao grande número de testes realizados, serão feitas análises mensais das séries temporais da velocidade do vento e da temperatura; assim como as rosas dos ventos, apenas para a modelagem que apresenta a parametrização com a que o modelo WRF consegue representar melhor as variáveis meteorológicas avaliadas para a RMGV, logrando atingir um maior número de indicadores propostos na literatura pelos autores já mencionados.

## 5.1. Verão

Os resultados das variáveis meteorológicas de temperatura (2 m), velocidade e direção do vento (10 m), obtidos nas diferentes simulações meteorológicas realizadas (TABELA 2) para o mês de fevereiro de 2010 foram comparados com os dados observacionais medidos pelas diferentes estações pertencentes a RAMQAr e o aeroporto que contam com medição destas variáveis (TABELA 3).

Na FIGURA 17 são apresentados os gráficos “soccer goal” para os resultados dos indicadores estatísticos da velocidade do vento para as estações de Carapina, Enseada do Suá, Ibes, Carapina e o aeroporto. Estes resultados correspondem ao conjunto das 17 modelagens [M\_1 (esquema YSU para a CLA e esquema MM5 melhorado para a CLS), M\_2 (esquema YSU para a CLA e MM5 para a CLS), M\_3 (esquema MYJ para a CLA e Eta para a CLS), M\_4 (esquemas NCEP tanto para a CLA quanto a CLS), M\_5 (esquema ACM2 para a CLA e esquema MM5 para a CLS), M\_6 (esquema ACM2 para a CLA e esquema MM5), M\_7 (esquema Boulac para a CLA e esquema MM5 melhorado para a CLS), M\_8 (esquema Boulac para a CLA e esquema Eta para a CLS), M\_9 (esquema Boulac para a CLA e MM5 para a CLS), M\_10 (esquema UW para a CLA e MM5 melhorado para a CLS), M\_11 (esquema UW para a CLA e Eta para a CLS), M\_12 (esquema UW para a CLA e MM5 para a CLS), M\_13 (esquema TEMF para a CLA e TEMF para a CLS), M\_14 (esquema GBM para a CLA e MM5 melhorado para a CLS), M\_15 (esquema GBM para a CLA e MM5 para a CLS), M\_16 (esquema MRF para a CLA e MM5 melhorado para a CLS) e M\_17 (esquema MRF para a CLA e MM5 para a CLS)] nas quais testaram-se as diferentes combinações das parametrizações da CLA com as suas respectivas parametrizações da CLS.

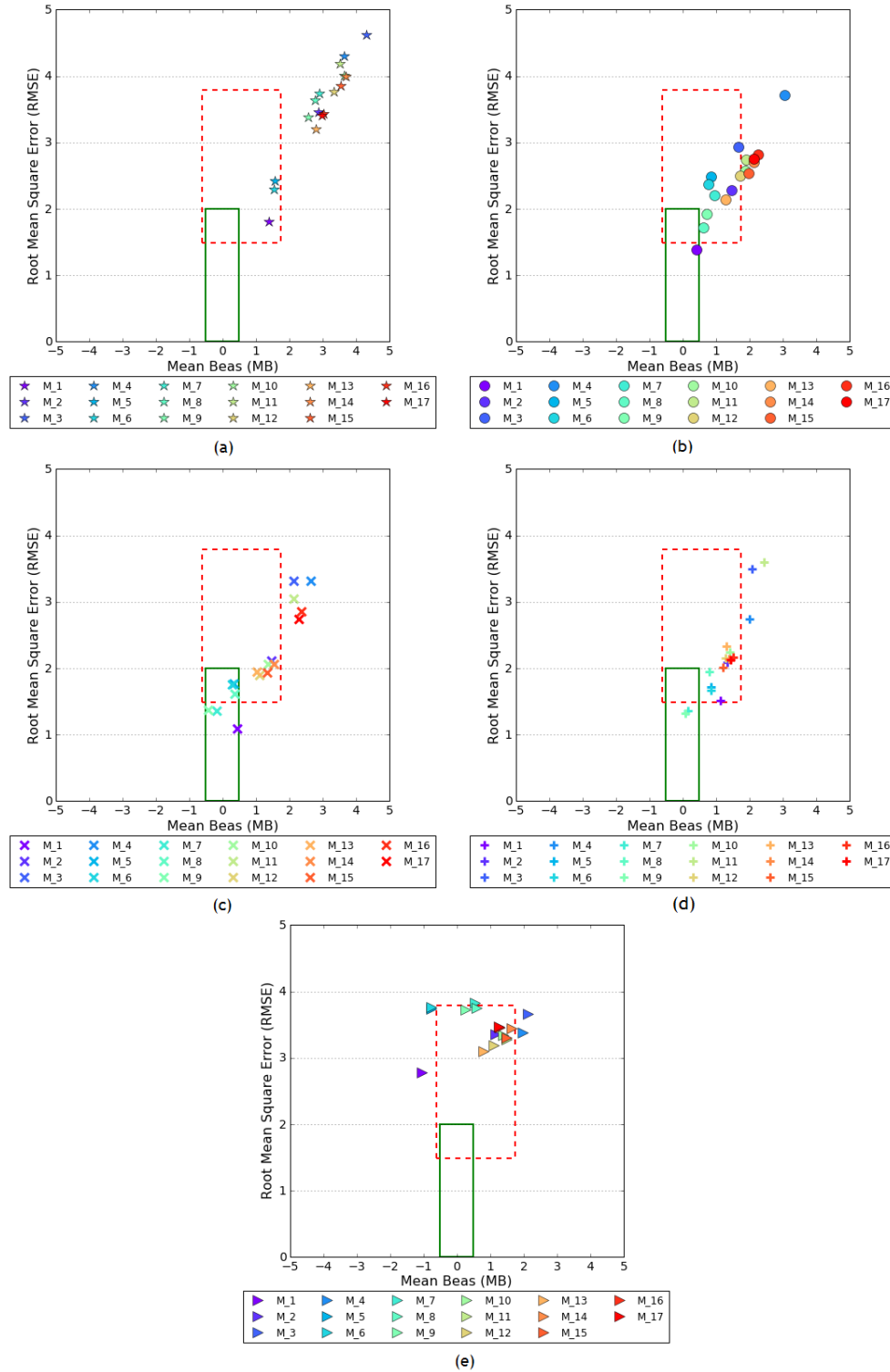


FIGURA 17: Gráfico soccer goal MB vs RMSE da velocidade do vento (10 m) para as estações de monitoramento pertencem a RAMQAr e o aeroporto: (a) Carapina, (b) Enseada do Suá, (c) Ibes, (d) Cariacica e (e) Aeroporto (02/2010) onde o polígono verde representa os critérios do Emery, et al., (2001) e o polígono vermelho representa os critérios dos autores Borge et al. (2008), Reboledo et al. (2014) e Zhang et al. (2014).

\* M\_1:YSU e MM5 melhorado, M\_2: YSU e MM5, M\_3: MYJ e Eta, M\_4: NCEP e NCEP, M\_5: ACM2 e MM5 melhorado, M\_6: ACM2 e MM5, M\_7: Boulac e MM5 melhorado, M\_8: Boulac e Eta, M\_9: Boulac e MM5, M\_10: UW e MM5 melhorado, M\_11: UW e Eta, M\_12: UW e MM5, M\_13: TEMF e TEMF, M\_14: GBM e MM5 melhorado, M\_15: GBM e MM5, M\_16: MRF e MM5 melhorado e M\_17: MRF e MM5.

Conforme o visto na FIGURA 17 e nos valores dos resultados dos testes estatísticos apresentados no apêndice desta dissertação, verifica-se que só três das cinco estações pertencentes a RAMQAR e o aeroporto contam com alguns valores dos resultados dos testes estatísticos que atingiram os indicadores propostos pelo Emery et al. (2001) para a velocidade do vento (10 m) as quais são a modelagem M\_1 para a estação Enseada do suá (MB = 0,41 e RMSE = 1,55), as modelagens M\_1, M\_5, M\_6, M\_7, M\_8 e M\_9 para estação Ibes (MB = 0,43; 0,33; 0,27; - 0,17; 0,36 e - 0,44 e RMSE = 1,20; 1,80; 1,79; 1,44; 1,71 e 1,44 respectivamente) e as modelagens M\_7 e M\_9 para a estação Cariacica (MB = 0,16 e RMSE = 1,41). Estas estações, além de apresentar valores estatísticos que atingiram os indicadores propostos pelo Emery et al. (2001), apresentam junto com as outras estações pertencentes a RAMQAR e o aeroporto valores estatísticos que ficaram dentro das faixas de variação obtidas pelos autores Borge et al. (2008), Reboredo et al. (2014) e Zhang et al. (2014) para a mesma variável meteorológica as quais são as modelagens M\_1, M\_5 e M\_6 para a estação de Carapina (MB = 1,38; 1,57 e 1,50 e RMSE = 1,85; 2,41 e 2,30 respectivamente), as modelagens M\_2, M\_3, M\_5, M\_6, M\_7, M\_9, M\_12 e M\_13 para a estação da Enseada do Suá (MB = 1,45; 1,67; 0,83; 0,78; 0,94; 0,73; 1,73 e 1,29 e RMSE = 2,33; 3,09; 2,55; 2,43; 2,31; 2,05; 2,59 e 2,26 respectivamente), as modelagens M\_2, M\_10, M\_12, M\_13, M\_14 e M\_15 para a estação Ibes (MB = 1,46; 1,36; 1,10; 1,02; 1,55 e 1,33 e RMSE = 2,15; 3,41; 3,38; 2,07; 1,93; 2,01; 2,10 e 1,96), as modelagens M\_1, M\_2, M\_6, M\_8, M\_9, M\_10, M\_12, M\_13, M\_14, M\_15 e M\_17 para a estação Cariacica (MB = 1,14; 1,33; 0,86; 0,80; 1,41; 1,28; 1,30; 1,38; 1,20; 1,51 e 1,44 e RMSE = 1,58; 2,15; 1,66; 2,02; 2,28; 2,18; 2,38; 2,17; 2,04; 2,19 e 2,15 respectivamente) e as modelagens M\_1, M\_2, M\_5, M\_6, M\_10, M\_11, M\_12, M\_13, M\_14, M\_15, M\_16 e M\_17 para a estação do aeroporto (MB = -1,05; 1,15; - 0,77; - 0,76; 1,38; 1,49; 1,11; 0,81; 1,64; 1,50; 1,28 e 1,26 e RMSE = 2,63; 3,30; 3,74; 3,76; 3,32; 3,05; 3,10; 3,06; 3,43; 3,30; 3,41 e 3,45 respectivamente). Segundo esta informação pode-se dizer que a velocidade do vento modelada pelo modelo WRF para a RMGV apresenta uma boa acurácia, tendo em conta tanto os indicadores propostos pelo Emery et al. (2001) e os demais autores [Borge et al. (2008), Reboredo et al. (2014) e Zhang et al. (2014)] para esta variável meteorológica, para a grande maioria das estações pertencentes a RAMQAR e o aeroporto. A estação Cariacica foi a estação melhor representada pelo modelo com um total de 76,47% dos dados atingindo os indicadores propostos pelo Emery et al. (2001) e os demais autores e a estação Carapina foi a estação que apresentou a menor porcentagem de valores atingindo estes indicadores (17,65%).



Na FIGURA 18 são apresentados os gráficos “soccer goal” para os resultados dos indicadores estatísticos para a direção do vento para as estações de Carapina, Enseada do Suá, Ibes e o aeroporto; excluindo a estação Cariacica que não conta com medição desta variável meteorológica.

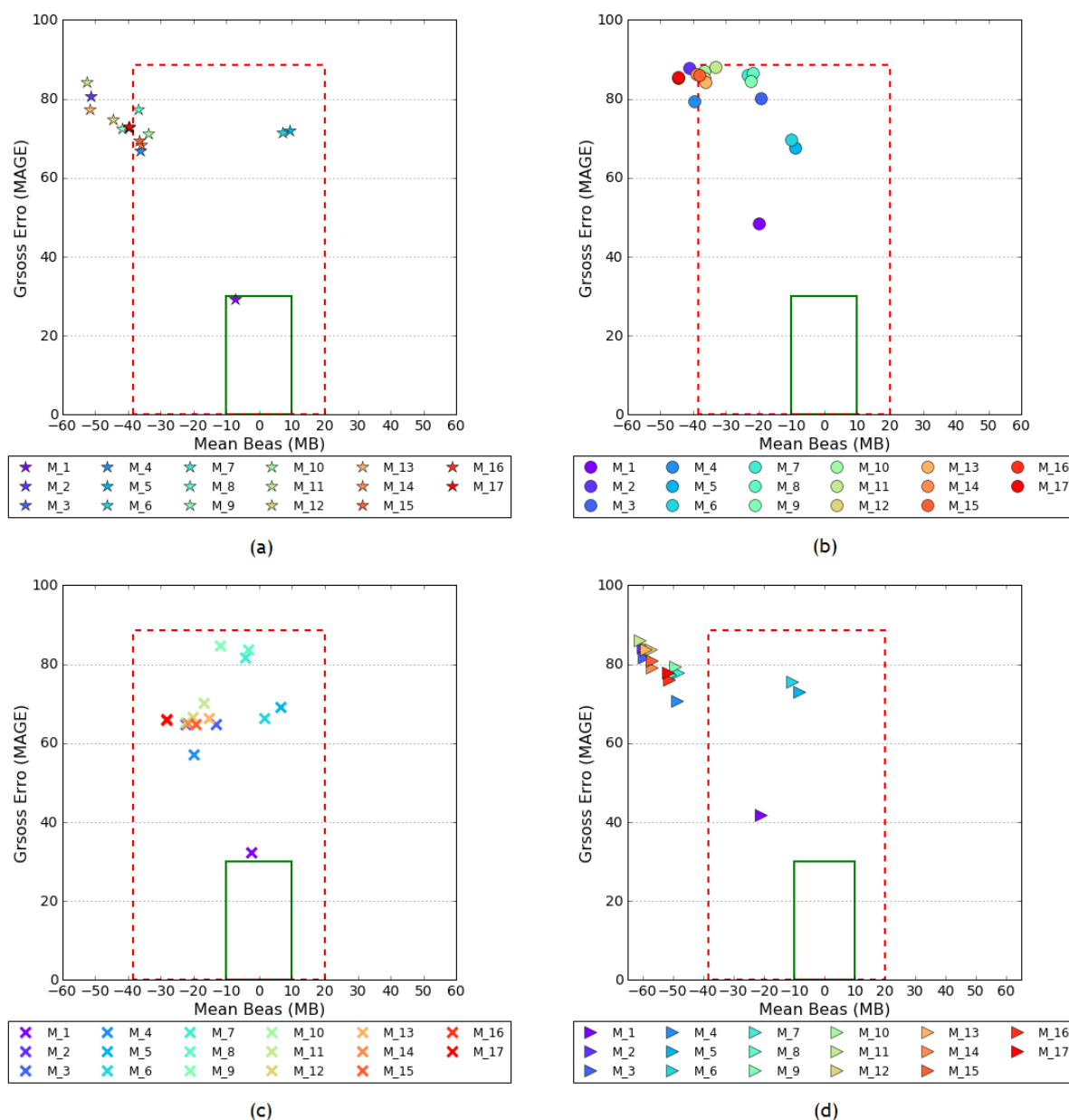


FIGURA 18: Gráfico soccer goal MB vs RMSE da direção do vento (10 m) para as estações de monitoramento pertencentes a RAMQAr e o aeroporto: (a) Carapina, (b) Enseada do Suá, (c) Ibes e (d) Aeroporto (02/2010) onde o polígono verde representa os critérios do Emery, et al., (2001) e o polígono vermelho representa os critérios dos autores Borge et al. (2008), Reboredo et al. (2014) e Zhang et al. (2014).

\* M\_1:YSU e MM5 melhorado, M\_2: YSU e MM5, M\_3: MYJ e Eta, M\_4: NCEP e NCEP, M\_5: ACM2 e MM5 melhorado, M\_6: ACM2 e MM5, M\_7: Boulac e MM5 melhorado, M\_8: Boulac e Eta, M\_9: Boulac e MM5, M\_10: UW e MM5 melhorado, M\_11: UW e Eta, M\_12: UW e MM5, M\_13: TEMF e TEMF, M\_14: GBM e MM5 melhorado, M\_15: GBM e MM5, M\_16: MRF e MM5 melhorado e M\_17: MRF e MM5.

Verifica-se na FIGURA 18 e nos valores dos resultados dos testes estatísticos apresentados no apêndice desta dissertação, que de todas as estações pertencentes a RAMQAr e o aeroporto só a estação Carapina conta com uma modelagem (M\_1) que logrou atingir os indicadores propostos pelo Emery et al. (2001) para a direção do vento (10 m) (MB = -7,10 e RMSE 29,03). Além desta estação atingir os indicadores propostos pelo Emery et al. (2001) para a direção do vento (10 m), apresenta também, junto com as outras estações da RAMQAr e o aeroporto, valores estatísticos que ficaram dentro das faixas de variação obtidas pelos autores Borge et al. (2008), Reboredo et al. (2014) e Zhang et al. (2014) para esta mesma variável meteorológica as quais são a modelagens M\_4, M\_5, M\_6, M\_8, M\_10, M\_14 e M\_15 para a estação Carapina (MB = - 36,30; 9,20; 7,06; - 36,84; - 33,79; - 36,05 e -36,72 e RMSE = 66,96; 72,05; 71,53; 77,28; 71,31; 68,57 e 69,49 respectivamente), as modelagens M\_1, M\_3, M\_5, M\_6, M\_7, M\_8, M\_9, M\_10, M\_11, M\_12 e M\_13 para a estação Enseada do Suá (MB = - 19,89; - 19,39; - 9,03; - 10,25; - 23,38; - 22,02; - 22,47; - 36,64; - 33,47; - 36,66 e - 36,5 e RMSE = 48,48; 80,07; 67,76; 69,56; 86,00; 86,45; 84,63; 87,11; 88,07; 85,22 e 84,31 respectivamente), as modelagens todas para a estação Ibes (MB = - 2,31; - 22,49; - 13,34; - 20,15; 6,26; 1,59; - 4,25; - 3,38; - 12,33; - 22,54; - 17,07; - 20,30; - 15,45; - 21,96; - 19,48; - 28,47 e - 28,24 e RMSE = 32,34; 64,76; 64,75; 57,02; 69,19; 66,32; 81,71; 83,76; 84,59; 65,33; 69,97; 66,39; 66,23; 65,12; 64,75; 65,75 e 65,96 respectivamente) e as modelagens M\_1, M\_5 e M\_6 para a estação do aeroporto (MB = - 20,95; - 8,27 e - 10,75 e RMSE = 41,59; 73,07 e 75,48 respectivamente). Segundo a informação apresentada anteriormente pode-se ver que a direção do vento simulada pelo modelo WRF apresenta uma acurácia maior para a estação Ibes onde 100% dos dados atingiram os indicadores propostos pelo Emery et al. (2001) e os demais autores para esta variável meteorológica e a estação que apresentou a menor acurácia dos valores reais medidos com os valores modelados pelo WRF foi a estação do aeroporto que conta com 17,65% dos dados atingindo estes indicadores propostos na literatura para a direção do vento.

Na FIGURA 19 são apresentados os gráficos “soccer goal” para os resultados dos indicadores estatísticos para a temperatura do ar para as estações de Carapina, Cariacica e o aeroporto; excluindo as estações Enseada do Suá e Ibes que não contam com medição desta variável meteorológica.

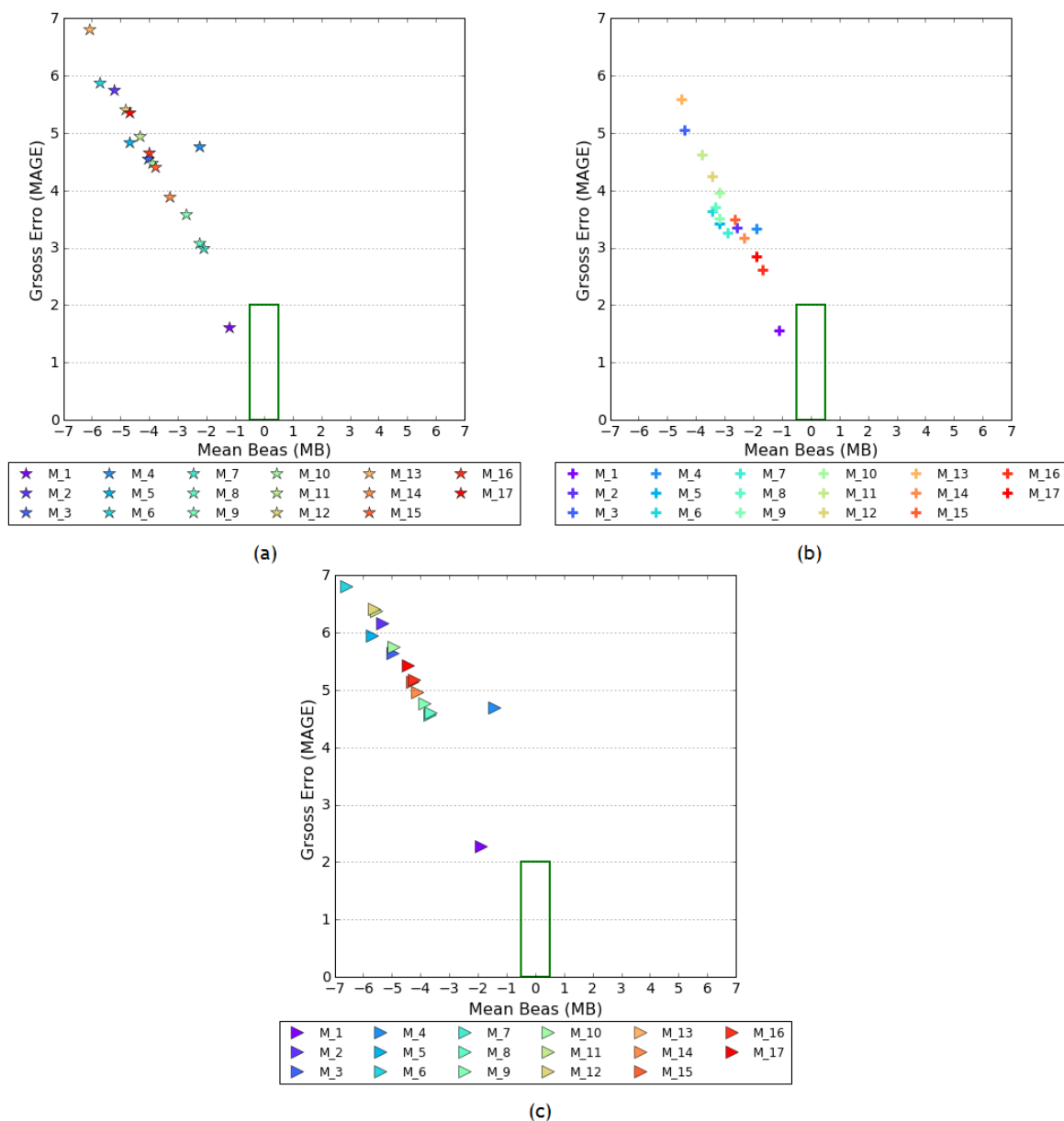


FIGURA 19: Gráfico soccer goal MB vs RMSE da velocidade superficial (2 m) para as estações de monitoramento pertencentes a RAMQAr e o aeroporto: (a) Carapina, (b) Cariacica e (c) Aeroporto (02/2010) onde o polígono verde representa os critérios do Emery, et al., (2001).

\* M\_1:YSU e MM5 melhorado, M\_2: YSU e MM5, M\_3: MYJ e Eta, M\_4: NCEP e NCEP, M\_5: ACM2 e MM5 melhorado, M\_6: ACM2 e MM5, M\_7: Boulac e MM5 melhorado, M\_8: Boulac e Eta, M\_9: Boulac e MM5, M\_10: UW e MM5 melhorado, M\_11: UW e Eta, M\_12: UW e MM5, M\_13: TEMF e TEMF, M\_14: GBM e MM5 melhorado, M\_15: GBM e MM5, M\_16: MRF e MM5 melhorado e M\_17: MRF e MM5.

Conforme observado na FIGURA 19 e nos valores dos resultados dos testes estatísticos presentes no apêndice desta dissertação, pode-se ver que nenhuma das modelagens realizadas pelo modelo WRF conseguiu representar com uma boa acurácia os valores da temperatura medidos nas diferentes estações, já que para nenhuma estação os resultados dos testes estatísticos realizados conseguiram atingir os valores dos indicadores propostos pelo Emery, et al., (2001) para esta

variável meteorológica. Porém, a modelagem M\_1, para as estações de Carapina e Cariacica, apresentou valores dos testes estatísticos MAGE e IOA que encontram-se nos rangos propostos para estes testes para esta variável (MAGE = 1,72 e 1,51 e IOA = 0,89 e 0,89 respectivamente) e para a estação do aeroporto apresentou o valor do IOA (0,83). Estes resultados puderam se apresentar devido à falta de precisão dos dados do uso e ocupação de solo ou que as outras parametrizações físicas do modelo WRF utilizadas nas diferentes simulações não são as parametrizações ótimas para representas as condições meteorológicas de uma região como a RMGV no período de verão onde a região apresenta um maior número de horas exposta à radiação solar, aumentando os fluxos convectivos e modificando assim o desenvolvimento da CLA ao longo do dia.

Feito a análise dos diferentes gráficos “soccer goal” e os resultados dos testes estatísticos presentes no apêndice desta dissertação realizados para as diferentes variáveis meteorológicas avaliadas, para as estações pertencentes a RAMQAR e o aeroporto, pode-se dizer que a parametrização com que o modelo WRF conseguiu simular valores mais próximos aos valores reais medidos na RMGV e conseguiu atingir mais indicadores estatísticos propostos pelo Emery, et al., (2001) é a modelagem M\_1 que corresponde à parametrização dos esquema YSU para a CLA e MM5 melhorado para a CLS. Na TABELA 7 é apresentado o resumo dos valores dos testes estatísticos realizados com esta parametrização para cada estação pertence a RAMQAR e o aeroporto.

TABELA 7: Resumo dos valores estatísticos para a modelagem M\_1 (esquema YSU para a CLA e MM5 melhorado para a CLS.) para cada estação pertence a RMAQAr e o aeroporto para o período de verão (02/2010).

Variável meteorológica	Estatístico	Índice	Estação				
			Carapina	Enseada do Suá	Ibes	Cariacica	Aeroporto
Velocidade do vento (10 m)	MB	$\pm 0,5$	1,38	0,41	0,43	1,14	-1,05
	RMSE	$\leq 2,0$ m/s	1,85	1,55	1,20	1,58	2,63
	IOA	$\geq 0,6$	-0,17	0,55	0,72	0,40	0,46
	r	-	0,75	0,57	0,69	0,70	0,71
	Máximo (m/s)	-	8,24	7,74	7,20	6,46	8,64
	Mínimo (m/s)	-	0,11	0,34	0,26	0,31	0,08
Direção do vento (10 m)	MB	$\pm 10$	-7,10	-19,89	-2,31	N/A	-20,95
	MAGE	$\leq 30$ graus	29,03	48,48	32,34	N/A	41,59
	r	-	0,37	0,35	0,34	N/A	0,22
Temperatura (2 m)	MB	$\pm 0,5$ K	-1,23	N/A	N/A	-1,12	-1,89
	MAGE	$\leq 2$ K	1,72	N/A	N/A	1,51	2,08
	IOA	$\geq 0,8$	0,89	N/A	N/A	0,89	0,83
	r	-	0,89	N/A	N/A	0,95	0,88
	Máximo (°C)	-	34,31	N/A	N/A	31,56	34,86
	Mínimo (°C)	-	21,73	N/A	N/A	24,23	16,00

Na tabela anterior pode se apreciar que a variável meteorológica melhor representada pelo modelo WRF com a parametrização com a que foi realizada a modelagem M\_1 para todas as estações de monitoramento pertencentes a RAMQAr e o aeroporto é a velocidade do vento, atingindo nos indicadores propostos pelo Emery, et al., (2001) nos valores dos resultados dos testes estatísticos MB para as estações Enseada do Suá e Ibes (0,41 e 0,43 respectivamente); RMSE para as estações Carapina, Enseada do Suá, Ibes e Cariacica (1,85; 1,55; 1,20 e 1,58 respectivamente) e IOA para a estação Ibes (0,72); e conseguindo atingir também os valores dos indicadores propostos pelos autores Borge et al. (2008), Reboredo et al. (2014) e Zhang et al. (2014) nos valores dos testes estatísticos MB para as estações todas (Carapina = 1,38; Enseada do suá = 0,41; Ibes = 0,43 Cariacica = 1,14 e o aeroporto = -1,05) e RMSE para as estações Carapina, Enseada do suá, Cariacica e aeroporto (1,85; 1,55; 1,58 e 2,63 respectivamente), seguida pela temperatura superficial que conseguiu atingir nos indicadores propostos pelo Emery, et al., (2001) nos valores dos resultados dos testes estatísticos MAGE para as estações de Carapina e Cariacica (1,72 e 1,51 respectivamente) e o IOA para as estações todas (0,89 para Cariacica e Carapina e 0,83 para o aeroporto). A direção do vento é a variável meteorológica na qual o modelo apresentou menor acurácia na sua modelagem na M\_1, atingindo os valores dos indicadores propostos pelo Emery, et

al., (2001) nos resultados do MB para as estações Carapina e Ibes (- 7,10 e - 2,31) e o MAGE para a estação Carapina (29,03) e os valores das faixas de variação obtidas pelos autores Borge et al. (2008), Reboredo et al. (2014) e Zhang et al. (2014).

Com o objetivo de ver o desempenho do modelo WRF simulando as variáveis meteorológicas medidas pelas diferentes estações de monitoramento presentes na RMGV na modelagem M\_1, que como se viu anteriormente foi a que apresentou valores simulados mais pertos dos valores reais medidos e logrou atingir um maior número de indicadores estatísticos propostos pelos diferentes autores, são apresentados os gráficos “soccer goal” para as variáveis meteorológicas avaliadas no período de verão (FIGURA 20) com o fim de ver o comportamento destas para cada uma das estações pertencentes a RAMQAr e o aeroporto.

Observando a FIGURA 20 pode-se apreciar que os únicos valores que conseguiram atingir os indicadores estatísticos propostos pelo Emery, et al., (2001) foram a velocidade do vento para as estações Enseada do Suá e Ibes (MB = 0,41 e 0,43 e RMSE = 1,5 e 1,20 respectivamente) e a direção do vento para a estação Carapina (MB = -7,10 e MAGE = 29,03). Pode-se ver que para a velocidade do vento as únicas estações para as que o modelo WRF conseguiu atingir os valores dos indicadores propostos pelo Emery et al., (2001) foram as estações Enseada do Suá e Ibes mas pode-se ver também que o modelo consegue manter um erro aceitável na simulação desta variável já que segundo os resultados dos testes estatísticos feitos, os valores simulados para as estações Carapina e Cariacica ficaram dentro os valores das faixas de variação obtidas pelos autores Borge et al. (2008), Reboredo et al. (2014) e Zhang et al. (2014); sendo a estação Enseada do Suá a única estação que consegue atingir nos indicadores propostos tanto pelo Emery et al., (2001) quanto os indicadores propostos pelos demais autores. Para a direção do vento a única estação que o modelo atinge os indicadores estatísticos propostos pelo Emery et al., (2001), igual que os propostos pelos demais autores, é a estação Carapina (MB = - 7,10 e RMSE = 29,03), porém, o modelo WRF consegue simular esta variável atingindo os indicadores estatísticos propostos pelos autores Borge et al. (2008), Reboredo et al. (2014) e Zhang et al. (2014) para as estações todas.

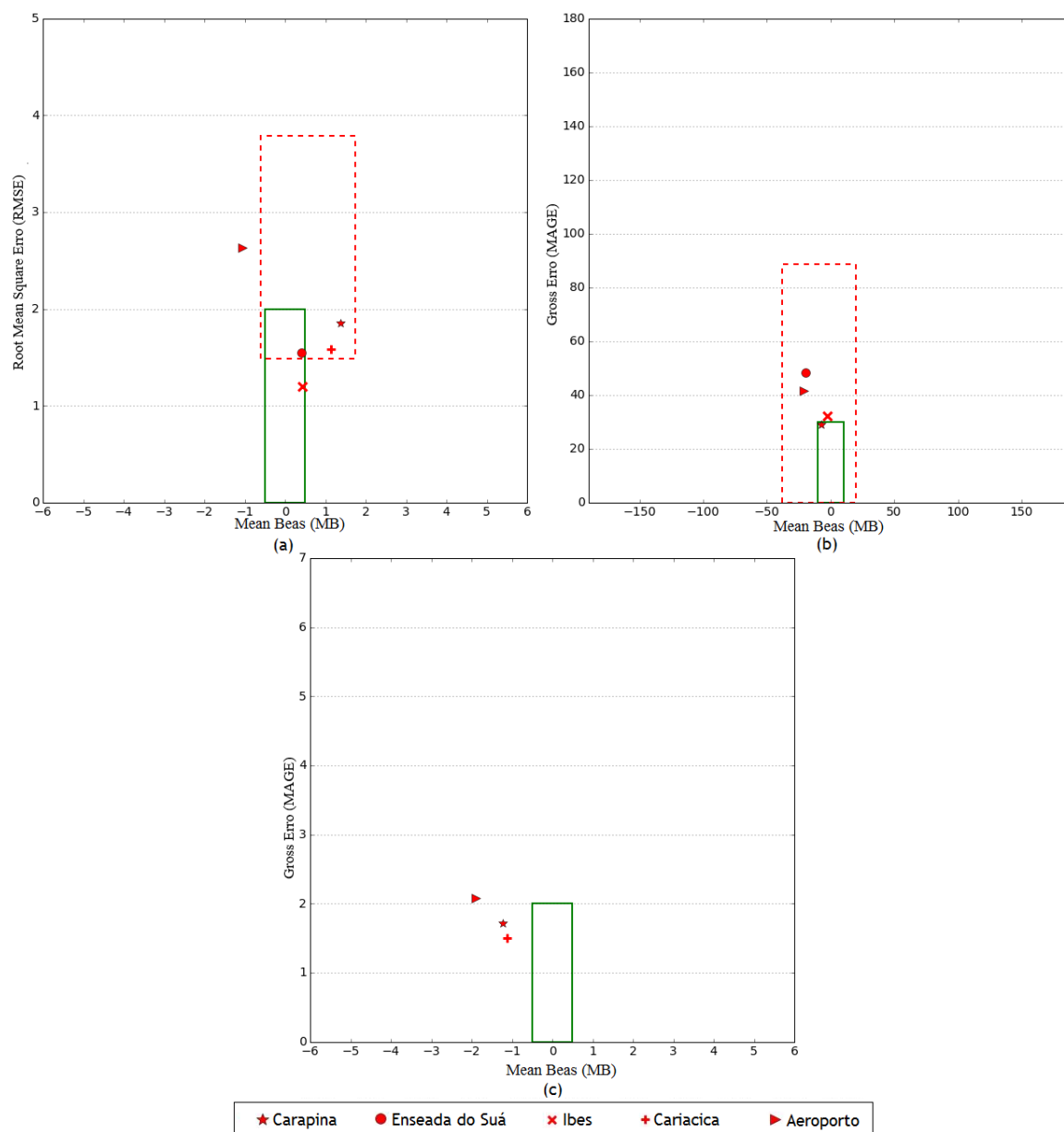


FIGURA 20: Gráfico soccer goal da: (a) Velocidade do vento (10 m), (b) direção do vento (10 m) e (c) temperatura superficial (2 m) para as estações de monitoramento pertencentes a RAMQAr e o aeroporto para a modelagem M\_1 (esquema YSU para a CLA e MM5 melhorado para a CLS.) no período de verão (02/2010) onde o polígono verde representa os critérios do Emery, et al., (2001) e o polígono vermelho representa os critérios dos autores Borge et al. (2008), Reboredo et al. (2014) e Zhang et al. (2014).

A temperatura, que conta só com os indicadores propostos pelo Emery et al., (2001), é a única variável na qual o modelo não consegue simular valores que atinham tanto os valores dos indicadores propostos para o MB e o MAGE para esta variável atmosférica nas diferentes estações de monitoramento na RMGV. Porém, os resultados dos testes estatísticos realizados para esta

variável mostram que o modelo WRF conseguiu simular valores que atingiram os indicadores propostos para o MAGE nas estações Carapina e Cariacica (1,72 e 1,51 respectivamente) e para o IOA para as estações Carapina, Cariacica e o aeroporto (0,89; 0,89 e 0,83 respectivamente).

Com o objetivo de avaliar a evolução diária das diferentes variáveis meteorológicas modeladas com o WRF e como é seu comportamento segundo os valores reais medidos, foram realizados os gráficos das séries temporais para a velocidade do vento e a temperatura superficial.

Na FIGURA 21 pode-se observar os diferentes gráficos que representam as series temporais da velocidade do vento da modelagem M\_1 para as diferentes estações pertencentes a RAMQAr e o aeroporto para fevereiro de 2010.



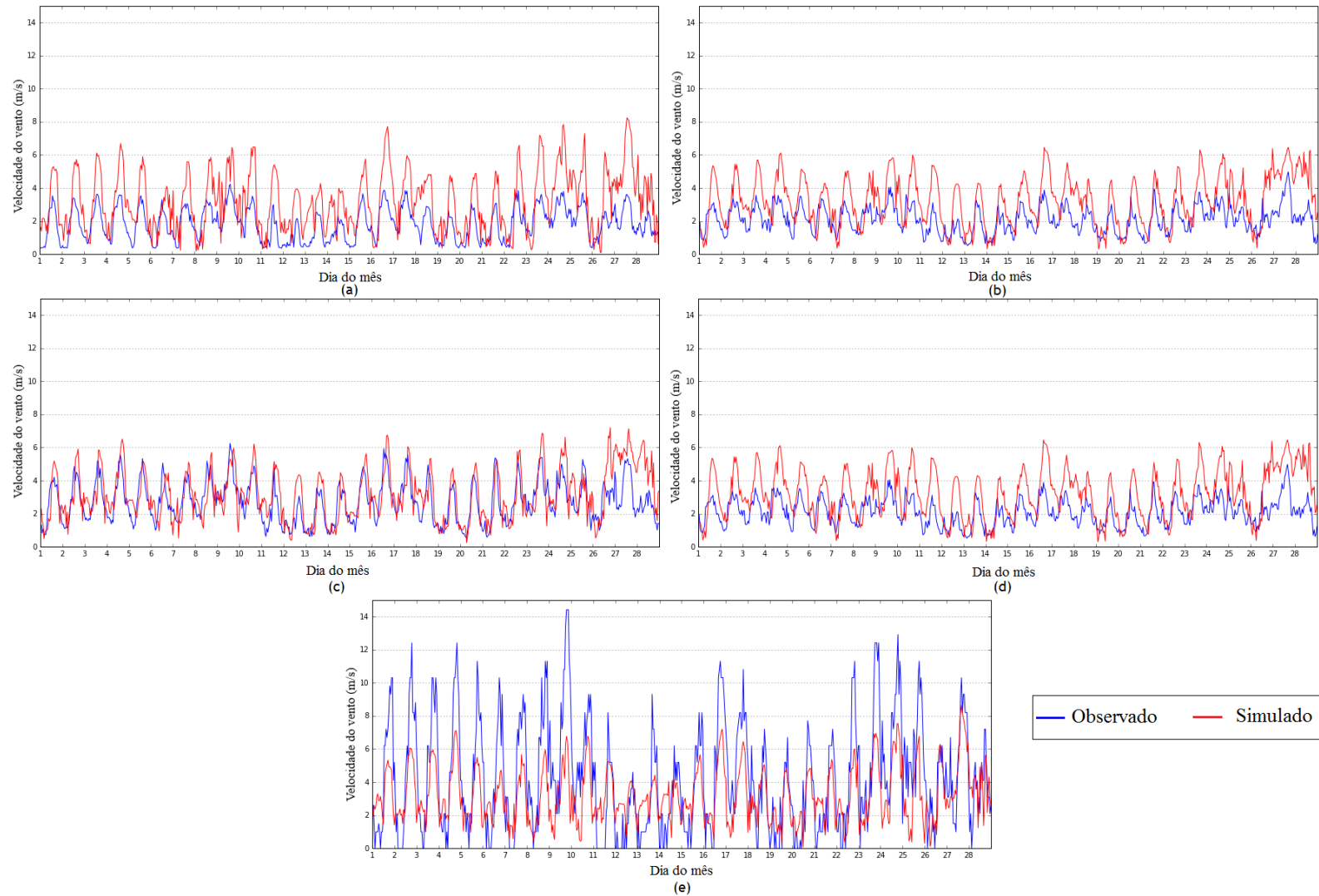


FIGURA 21: Série temporal da velocidade do vento (10 m) para as estações de monitoramento pertencentes a RAMQAr e o aeroporto: (a) Carapina, (b) Enseada do Suá, (c) Ibes, (d) Cariacica e (e) Aeroporto para a modelagem M\_1 (esquema YSU para a CLA e MM5 melhorado para a CLS.) no período de verão (02/2010) onde a linha de cor azul corresponde aos valores medidos nas diferentes estações e a linha vermelha corresponde aos valores simulados pelo modelo WRF.

Na figura anterior pode-se observar que para as estações Carapina, Enseada do Suá, Ibes e Cariacica, o modelo WRF superestima os valores extremos da velocidade do vento ao longo do mês, sendo a estação do aeroporto a que apresenta um resultado diferente às demais já que nesta estação os valores extremos desta variável são subestimados pelo modelo WRF. A estação que apresenta resultados simulados pelo WRF mais pertos aos valores reais medidos é a estação Carapina onde os valores modelados apresentam uma correlação positiva moderada de 0,75 com os valores medidos. Em geral a evolução mensal da velocidade do vento simulada pelo WRF para o mês de fevereiro de 2010 representa, com uma boa acurácia, os valores desta variável o que concorda com os resultados dos diferentes gráficos “soccer goal” e tabelas onde a velocidade do vento é a variável meteorológica melhor representada atingindo em vários indicadores propostos na literatura pelos autores Emery et al. (2001) nos valores dos indicadores MB para as estações Enseada do Suá e Ibes e RMSE para as estações de Carapina, Enseada do Suá, Ibes e Cariacica e nos indicadores propostos pelos autores Borge et al. (2008), Reboredo et al. (2014) e Zhang et al. (2014) nos valores do MB das estações todas e no RMSE das estações Carapina, Enseada do Suá, Cariacica e o aeroporto.

Na FIGURA pode-se observar os diferentes gráficos que representam as rosas do vento mensais para as diferentes estações pertencentes a RAMQAr e o aeroporto da modelagem M\_1 no mês de fevereiro.

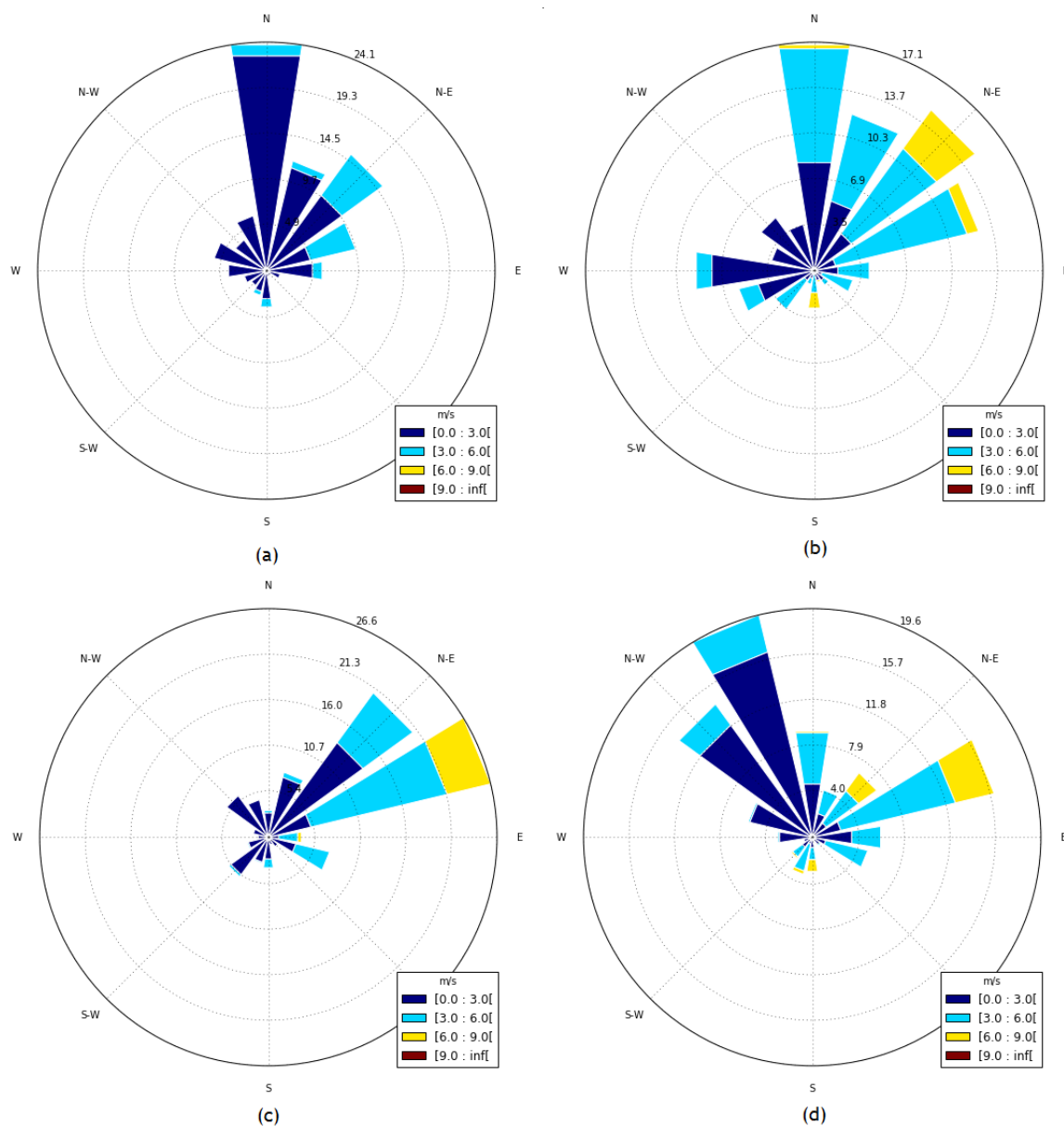


FIGURA 22: Rosas do vento para a direção do vento (10 m) para as estações de monitoramento pertencentes a RAMQAr e o aeroporto: (a e b) Carapina, (c e d) Enseada do Suá (e e f) Ibes e (g e h) Aeroporto para a modelagem M\_1 (esquema YSU para a CLA e MM5 melhorado para a CLS.) no período de verão (02/2010) onde a as rosas da esquerda (a, c, e e g) representam as rosas realizadas com os dados reais medidos e as rosas da direita (b, d, f e h) representam as rosas do vento realizadas com os dados simulados pelo modelo WRF para as diferentes estações.

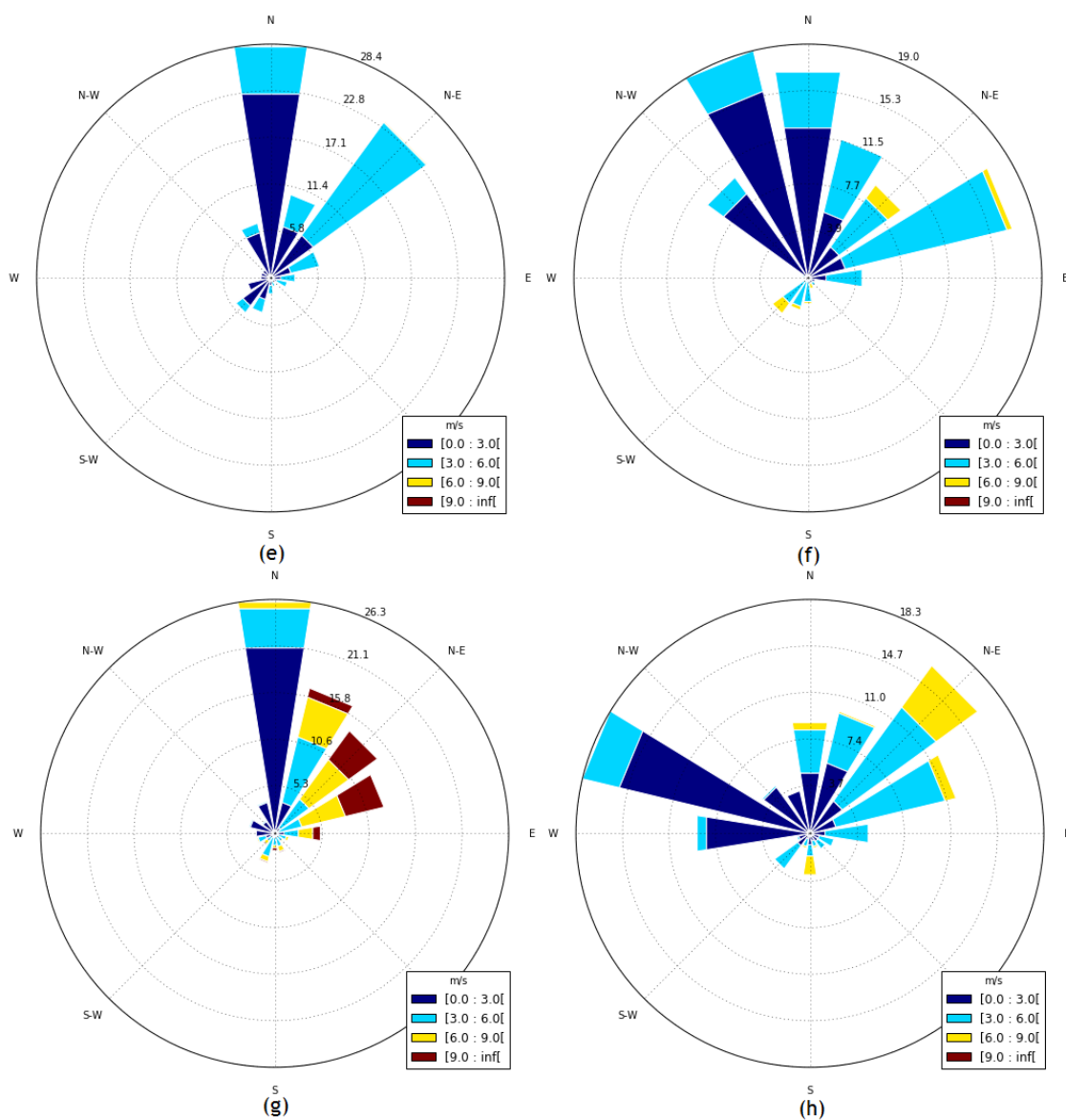


FIGURA 22: Continuação rosas do vento para a direção do vento (10 m) para as estações de monitoramento pertencentes a RAMQAr e o aeroporto: (a e b) Carapina, (c e d) Enseada do Suá (e e f) Ibes e (g e h) Aeroporto para a modelagem M\_1 (esquema YSU para a CLA e MM5 melhorado para a CLS.) no período de verão (02/2010) onde a as rosas da esquerda (a, c, e e g) representam as rosas realizadas com os dados reais medidos

e as rosas da direita (b, d, f e h) representam as rosas do vento realizadas com os dados simulados pelo modelo WRF para as diferentes estações.

Na figura anterior pode-se ver que a maioria das rosas de vento realizadas com os dados simulados pelo modelo WRF apresentam claras diferenças com as rosas de vento realizadas com os dados reais medidos nas diferentes estações de monitoramento. Para a estação Carapina (gráficos a e b) pode-se observar que tanto para os dados observados quanto para os dados simulados pelo WRF a direção predominante do vento é a direção norte [N] ( $0^\circ$ ) com 24,1% e 17,1% dos dados totais respectivamente; para a estação Enseada do Suá (gráficos c e d) pode-se observar que na rosa dos ventos realizada com os dados reais medidos, com 26,6% dos dados totais, a direção predominante do vento é leste-nordeste [ENE] ( $67,5^\circ$ ) e para os dados simulados é norte-noroeste [NNO] ( $337,5^\circ$ ), com 19,6% dos dados totais; para a estação Ibes, com 26,4% dos dados totais, a direção predominante do vento é N ( $0^\circ$ ) e para os dados simulados é NNO ( $337,5^\circ$ ), com 19,0% dos dados totais e para a estação do aeroporto, com 26,3% dos dados totais, a direção predominante do vento é N ( $0^\circ$ ) e para os dados simulados é oeste-noroeste [ONO] ( $292,5^\circ$ ), com 18,3% dos dados. Os gráficos apresentados anteriormente mostram que, falado também na análise das diferentes séries temporais para a velocidade do vento, que o modelo WRF superestima a maioria dos valores da velocidade para as estações todas da RAMQAr e o aeroporto. Porém, na maioria das simulações realizadas apresentem grandes diferenças nas direções predominantes do vento para as diferentes estações pertencentes a RAMQAr e o aeroporto, nas outras direções o modelo consegue simular com um erro aceitável o que tem concordância com o apresentado nos diferentes gráficos “soccer goal” e tabelas onde os resultados dos testes estatísticos realizados conseguem atingir os indicadores propostos pelo Emery et al. (2001) nos valores do MB e o MAGE na estação Carapina e no MAGE na estação Ibes e os valores do MB e o MAGE ficaram dentro das faixas de variação obtidas pelos autores Borge et al. (2008), Reboredo et al. (2014) e Zhang et al. (2014) para as todas as estações analisadas.

Na FIGURA 23 pode-se observar os diferentes gráficos que representam as séries temporais da temperatura superficial da modelagem M\_1 para as diferentes estações pertencentes a RAMQAr e o aeroporto para fevereiro de 2010.

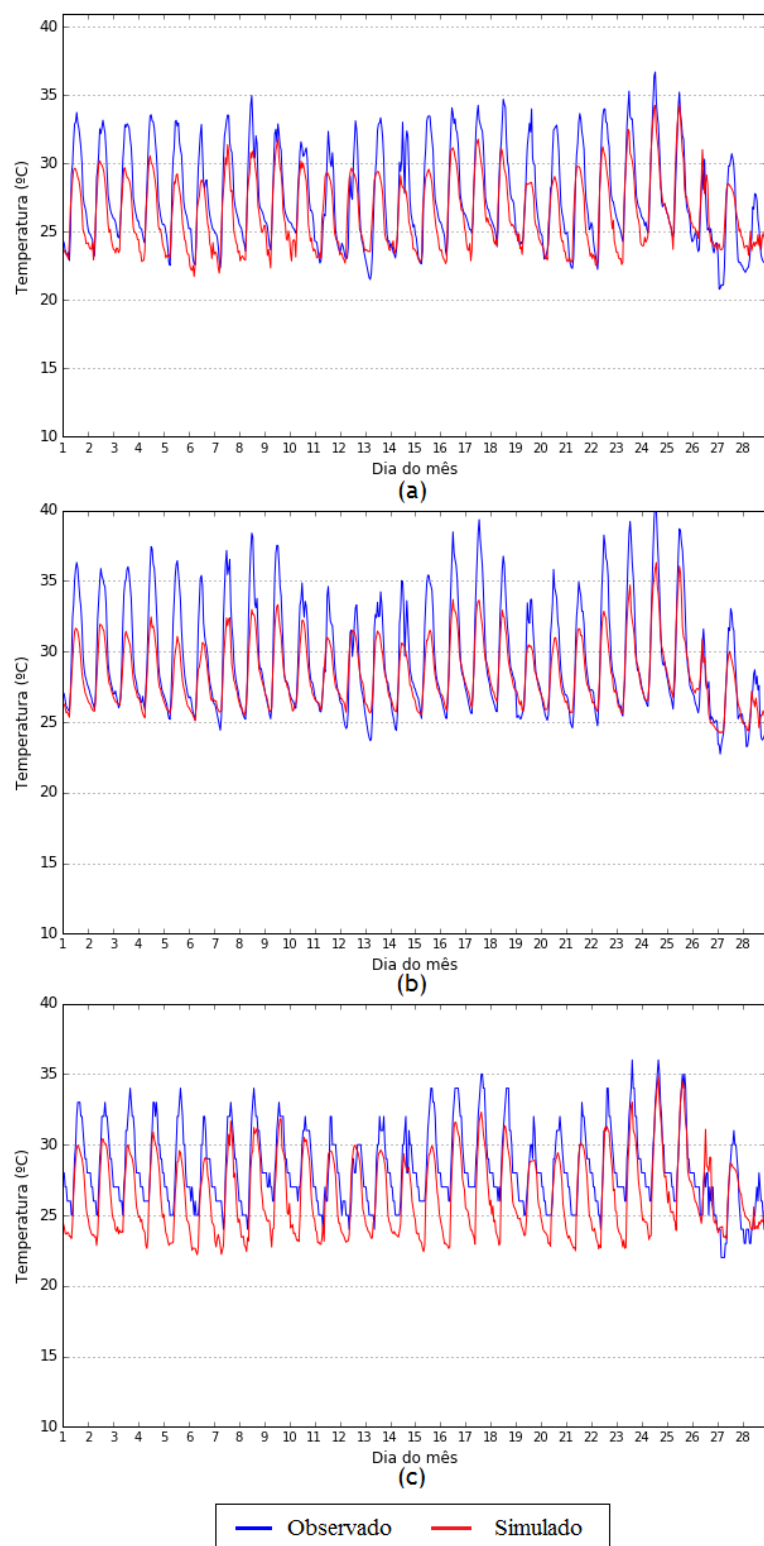


FIGURA 23: Série temporal da temperatura superficial (2 m) para as estações de monitoramento pertencentes a RAMQAr e o aeroporto: (a) Carapina, (b) Cariacica e (c) Aeroporto para a modelagem M\_1 (esquema YSU para a CLA e MM5 melhorado para a CLS.) no período de verão (02/2010) onde a linha de cor azul corresponde aos valores medidos nas diferentes estações e a linha vermelha corresponde aos valores simulados pelo modelo WRF.

Na figura anterior pode-se observar que a temperatura simulada pelo modelo WRF subestima os valores extremos desta variável ao longo do mês de fevereiro todo. Em geral a correlação que apresentam os valores simulados com os valores modelados é uma correlação positiva forte, sendo a estação Cariacica a que apresenta uma maior correlação, seguida da estação Carapina e a estação do aeroporto ( $r = 0,95$ ;  $0,89$  e  $0,88$  respectivamente); tendo concordância com os diferentes gráficos “soccer goal” e tabelas onde os dados simulados pelo WRF conseguiram simular com um erro aceitável os valores reais medidos em cada estação analisada da RMGV atingindo nos indicadores propostos pelo Emery et al. (2001) nos valores do MAGE para as estações Carapina e Cariacica ( $1,72$  e  $1,51$  respectivamente) e no IOA para todas as estações analisadas da RMGV (Carapina =  $0,89$ , Cariacica =  $0,89$  e Aeroporto =  $0,83$ ).

## 5.2. Inverno

Os resultados das variáveis meteorológicas de temperatura (2 m), velocidade e direção do vento (10 m), obtidos nas diferentes simulações meteorológicas realizadas (TABELA 2) para o mês de julho de 2010 foram comparados com os dados observacionais medidos pelas diferentes estações pertencentes a RAMQAr e o aeroporto que contam com medição destas variáveis (TABELA 3).

Na FIGURA 24 são apresentados os gráficos “soccer goal” para os resultados dos indicadores estatísticos da velocidade do vento para as estações de Carapina, Enseada do Suá, Ibes, Carapina e o aeroporto. Estes resultados correspondem ao conjunto das 17 modelagens [M\_1 (esquema YSU para a CLA e esquema MM5 melhorado para a CLS), M\_2 (esquema YSU para a CLA e MM5 para a CLS), M\_3 (esquema MYJ para a CLA e Eta para a CLS), M\_4 (esquemas NCEP tanto para a CLA quanto a CLS), M\_5 (esquema ACM2 para a CLA e esquema MM5 para a CLS), M\_6 (esquema ACM2 para a CLA e esquema MM5), M\_7 (esquema Boulac para a CLA e esquema MM5 melhorado para a CLS), M\_8 (esquema Boulac para a CLA e esquema Eta para a CLS), M\_9 (esquema Boulac para a CLA e MM5 para a CLS), M\_10 (esquema UW para a CLA e MM5 melhorado para a CLS), M\_11 (esquema UW para a CLA e Eta para a CLS), M\_12 (esquema UW para a CLA e MM5 para a CLS), M\_13 (esquema TEMF para a CLA e TEMF para a CLS), M\_14 (esquema GBM para a CLA e MM5 melhorado para a CLS), M\_15 (esquema GBM para a CLA e MM5 para a CLS), M\_16 (esquema MRF para a CLA e MM5 melhorado para a CLS) e M\_17 (esquema MRF para a CLA e MM5 para a CLS)] nas quais testaram-se as diferentes combinações das parametrizações da CLA com as suas respectivas parametrizações da CLS.

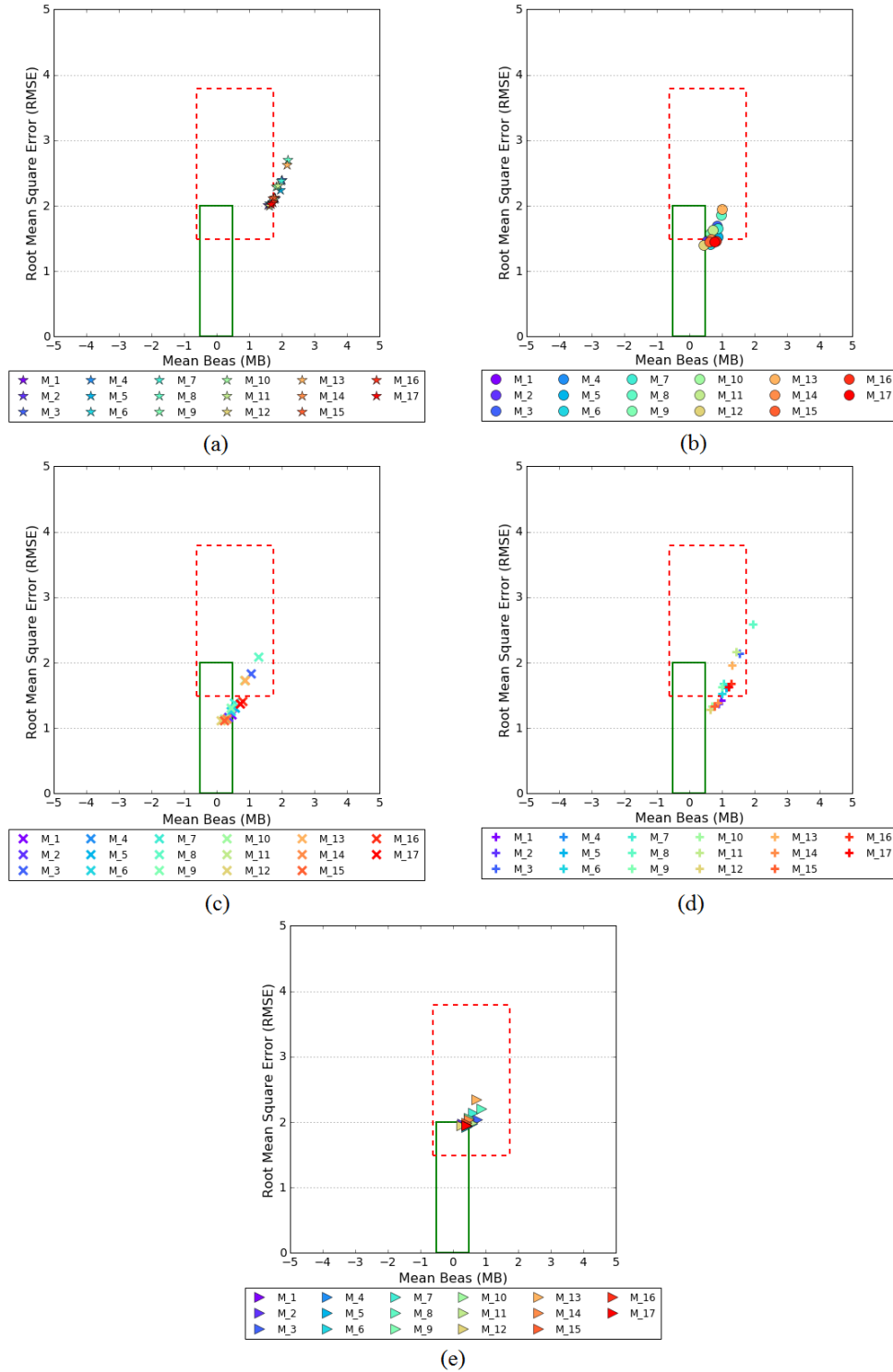


FIGURA 24: Gráfico soccer goal MB vs RMSE da velocidade do vento (10 m) para as estações de monitoramento pertencem a RAMQAr e o aeroporto: (a) Carapina, (b) Enseada do Suá, (c) Ibes, (d) Carapina e (e) Aeroporto (07/2010) onde o polígono verde representa os critérios do Emery, et al., (2001) e o polígono vermelho representa os critérios dos autores Borge et al. (2008), Reboredo et al. (2014) e Zhang et al. (2014).

\* M\_1:YSU e MM5 melhorado, M\_2: YSU e MM5, M\_3: MYJ e Eta, M\_4: NCEP e NCEP, M\_5: ACM2 e MM5 melhorado, M\_6: ACM2 e MM5, M\_7: Boulac e MM5 melhorado, M\_8: Boulac e Eta, M\_9: Boulac e MM5, M\_10: UW e MM5 melhorado, M\_11: UW e Eta, M\_12: UW e MM5, M\_13: TEMF e TEMF, M\_14: GBM e MM5 melhorado, M\_15: GBM e MM5, M\_16: MRF e MM5 melhorado e M\_17: MRF e MM5.



Conforme o visto na FIGURA 24 e nos valores dos resultados dos testes estatísticos apresentados no apêndice desta dissertação, verifica-se que só três das cinco estações pertencentes a RAMQAR e o aeroporto contam com alguns valores dos resultados dos testes estatísticos que atingiram os indicadores propostos pelo Emery et al. (2001) para a velocidade do vento (10 m) as quais são a modelagem M\_12 para a estação Enseada do Suá (MB = 0,44 e RMSE = 1,40), as modelagens M\_1, M\_2, M\_6, M\_9, M\_10, M\_12, M\_14 e M\_15 para estação Ibes (MB = 0,46; 0,37; 0,43; 0,44; 0,23; 0,14; 0,32 e 0,24 e RMSE = 1,20; 1,17; 1,25; 1,31; 1,13; 1,12; 1,14 e 1,12 respectivamente) e as modelagens M\_2, M\_6, M\_9, M\_10, M\_12, M\_14, M\_15, M\_16 e M\_17 para a estação do aeroporto (MB = 0,29; 0,42; 0,48; 0,43; 0,27; 0,48; 0,41; 0,44 e 0,41 e RMSE = 1,97; 1,88; 1,93; 1,92; 1,91; 1,94; 1,91; 1,92 e 1,92 respectivamente). Estas estações, além de apresentar valores estatísticos que atingiram os indicadores propostos pelo Emery et al. (2001), apresentam junto com as outras estações pertencentes a RAMQAR e o aeroporto valores estatísticos que ficaram dentro das faixas de variação obtidas pelos autores Borge et al. (2008), Reboredo et al. (2014) e Zhang et al. (2014) para a mesma variável meteorológica as quais são as modelagens M\_2, M\_6, M\_12, M\_15, M\_16 e M\_17 para a estação de Carapina (MB = 1,58; 1,61; 1,61; 1,72; 1,72 e 1,67 e RMSE = 2,01; 2,03; 2,00; 2,11; 2,04 e 2,02 respectivamente), as modelagens M\_1, M\_3, M\_5, M\_7, M\_8, M\_9, M\_11, M\_13 e M\_14 para a estação da Enseada do Suá (MB = 0,78; 0,85; 0,88; 0,89; 0,98; 0,64; 0,71; 1,00 e 0,66 e RMSE = 1,52; 1,69; 1,52; 1,65; 1,85; 1,58; 1,63; 1,95 e 1,49 respectivamente), as modelagens M\_3, M\_8, M\_11 e M\_13 para a estação Ibes (MB = 1,04; 1,29; 0,84 e 0,87 e RMSE = 1,83; 2,09; 1,73 e 1,73 respectivamente), as modelagens M\_3, M\_5, M\_6, M\_7, M\_9, M\_11, M\_13, M\_16 e M\_17 para a estação Cariacica (MB = 1,55; 1,14; 1,01; 1,06; 1,00; 1,44; 1,32; 1,28 e 1,21 e RMSE = 2,14; 1,62; 1,52; 1,67; 1,62; 2,16; 1,96; 1,68 e 1,63 respectivamente) e as modelagens todas para a estação do aeroporto, excetuando a modelagem M\_4 que apresenta valores do MB = 8,90 e do RMSE = 9,12. Segundo esta informação pode-se dizer que a velocidade do vento modelada pelo modelo WRF para a RMGV apresenta uma boa acurácia, tendo em conta tanto os indicadores propostos pelo Emery et al. (2001) e os demais autores [Borge et al. (2008), Reboredo et al. (2014) e Zhang et al. (2014)] para esta variável meteorológica, para a grande maioria das estações pertencentes a RAMQAR e o aeroporto. A estação do Aeroporto foi a estação melhor representada pelo modelo com um total de 54,94% dos dados atingindo os indicadores propostos pelo Emery et al. (2001) e os demais autores e a estação Carapina foi a estação onde nenhum dos valores dos resultados dos diferentes indicadores estatísticos atingiu estes indicadores.

Na FIGURA 25 são apresentados os gráficos “soccer goal” para os resultados dos indicadores estatísticos para a direção do vento para as estações de Carapina, Enseada do Suá, Ibes e o aeroporto; excluindo a estação Cariacica que não conta com medição desta variável meteorológica.

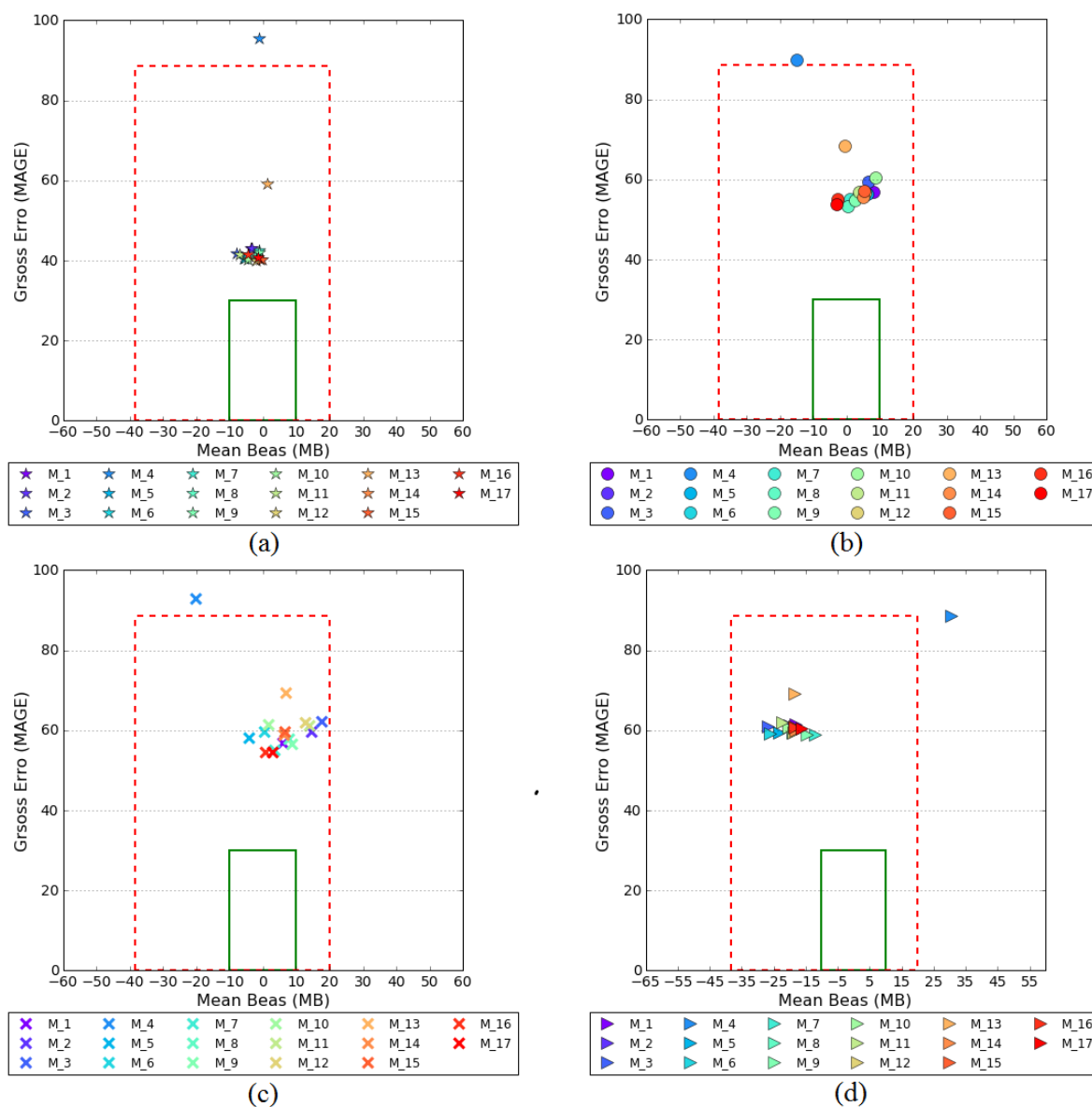


FIGURA 25: Gráfico soccer goal MB vs RMSE da direção do vento (10 m) para as estações de monitoramento pertencentes a RAMQAr e o aeroporto: (a) Carapina, (b) Enseada do Suá, (c) Ibes e (d) Aeroporto (07/2010) onde o polígono verde representa os critérios do Emery, et al., (2001) e o polígono vermelho representa os critérios dos autores Borge et al. (2008), Reboredo et al. (2014) e Zhang et al. (2014).

\* M\_1: YSU e MM5 melhorado, M\_2: YSU e MM5, M\_3: MYJ e Eta, M\_4: NCEP e NCEP, M\_5: ACM2 e MM5 melhorado, M\_6: ACM2 e MM5, M\_7: Boulac e MM5 melhorado, M\_8: Boulac e Eta, M\_9: Boulac e MM5, M\_10: UW e MM5 melhorado, M\_11: UW e Eta, M\_12: UW e MM5, M\_13: TEMF e TEMF, M\_14: GBM e MM5 melhorado, M\_15: GBM e MM5, M\_16: MRF e MM5 melhorado e M\_17: MRF e MM5.

Verifica-se na figura anterior e nos valores dos resultados dos testes estatísticos apresentados no apêndice desta dissertação, para nenhuma das estações pertencentes a RAMQAr e o aeroporto o modelo WRF conseguiu simular valores que atingiram os indicadores propostos pelo Emery et al. (2001) para a direção do vento (10 m). Porém, todas as modelagens realizadas com o modelo WRF, excetuando a modelagem M\_4 que corresponde aos esquemas NCEP tanto para a CLA quanto para a CLC, conseguiram ficar nas faixas de variação propostas para esta variável meteorológica pelos autores Borge et al. (2008), Reboredo et al. (2014) e Zhang et al. (2014). Segundo a informação apresentada anteriormente pode-se ver que a direção do vento simulada pelo modelo WRF apresenta uma acurácia maior para a estação Carapina onde os valores simulados apresentam valores mais perto dos valores dos indicadores propostos pelo Emery et al. (2001) para esta variável meteorológica e que só a modelagem M\_4 apresenta valores que não atingem nem os valores dos indicadores estatísticos propostos tanto pelo Emery et al. (2001) quanto pelos demais autores.

Na FIGURA 26 são apresentados os gráficos “soccer goal” para os resultados dos indicadores estatísticos para a temperatura do ar para as estações de Carapina, Cariacica e o aeroporto; excluindo as estações Enseada do Suá e Ibes que não contam com medição desta variável meteorológica.

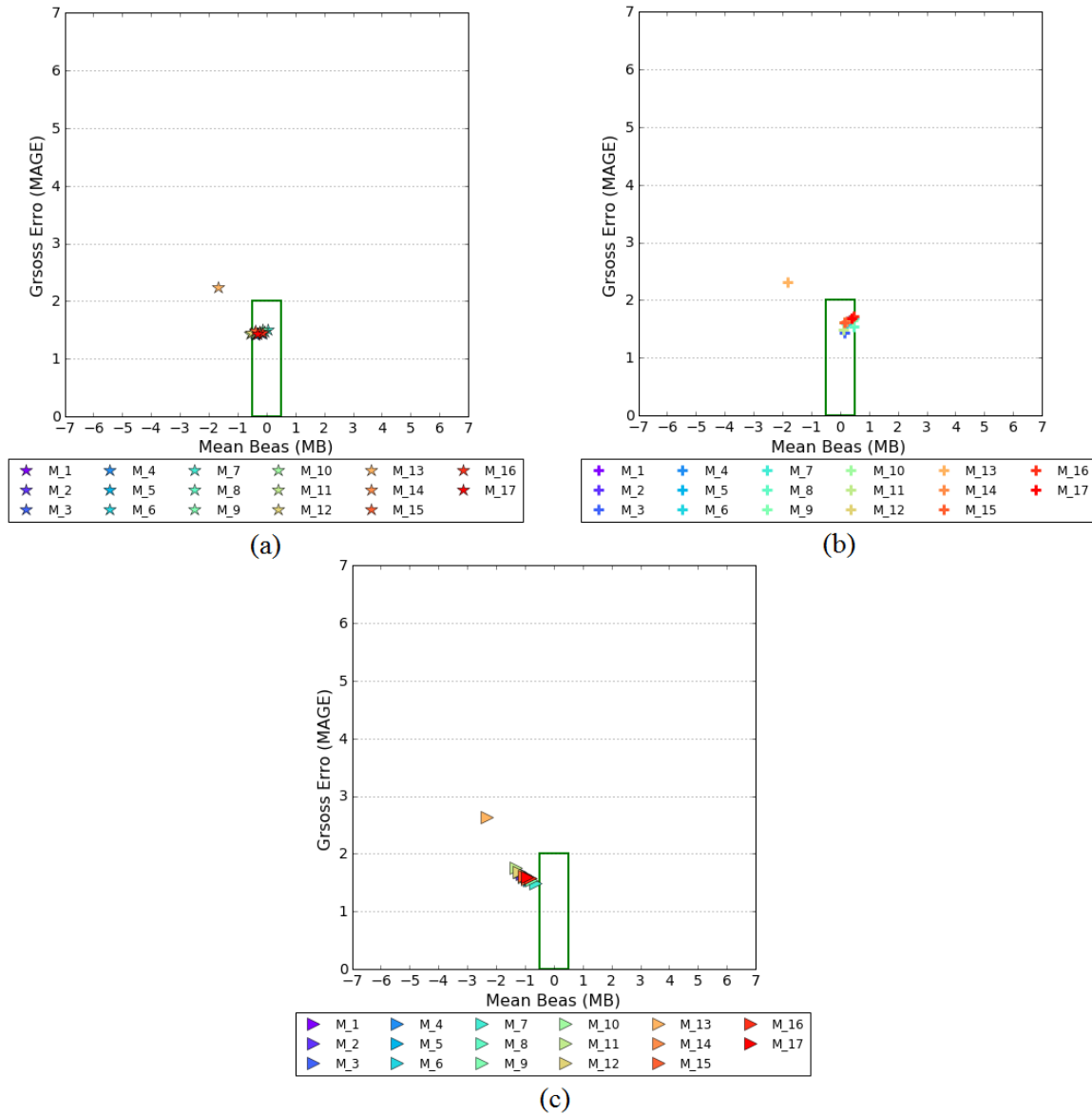


FIGURA 26: Gráfico soccer goal MB vs RMSE da velocidade superficial (2 m) para as estações de monitoramento pertencentes a RAMQAr e o aeroporto: (a) Carapina, (b) Carapina e (c) Aeroporto (07/2010) onde o polígono verde representa os critérios do Emery, et al., (2001).

\* M\_1:YSU e MM5 melhorado, M\_2: YSU e MM5, M\_3: MYJ e Eta, M\_4: NCEP e NCEP, M\_5: ACM2 e MM5 melhorado, M\_6: ACM2 e MM5, M\_7: Boulac e MM5 melhorado, M\_8: Boulac e Eta, M\_9: Boulac e MM5, M\_10: UW e MM5 melhorado, M\_11: UW e Eta, M\_12: UW e MM5, M\_13: TEMF e TEMF, M\_14: GBM e MM5 melhorado, M\_15: GBM e MM5, M\_16: MRF e MM5 melhorado e M\_17: MRF e MM5.

Conforme o observado na FIGURA 26 e nos valores dos resultados dos testes estatísticos apresetes no apêndice desta dissertação, pode-se ver que tanto a estação Carapina quanto a estação Cariacica apresentam valores de temperatura superficial simulados pelo modelo WRF, excetuando as modelagens M\_4 e M\_13 (MB = 14,56; -1,67 e 18,01; -1,84 e MAGE = 14,56; 2,18 e 18,01; 2,19 respectivamente), que conseguiram representar com uma boa acurácia os valores desta variável medidos nas diferentes estações, logrando atingir os valores dos indicadores propostos pelo Emery,

et al., (2001) para esta variável. Por outro lado, embora os valores simulados pelo WRF para a estação do aeroporto não conseguira atingir os valores do MB em nenhuma das modelagens realizadas, esta apresentou para as modelagens todas valores do MAGE, a exceção das modelagens M\_4, M\_11 e M\_16 e valores do IOA, excetuando as modelagens M\_4, M\_5 e M\_13, que atingiram os valores dos indicadores estatísticos propostos pelo Emery, et al., (2001) para esta variável para este mês do período de inverno.

Feito a análise dos diferentes gráficos “soccer goal” e os resultados dos testes estatísticos presentes no apêndice desta dissertação realizados para as diferentes variáveis meteorológicas avaliadas, para as estações pertences a RAMQAR e o aeroporto, pode-se dizer que a parametrização com a que o modelo WRF conseguiu simular valores mais próximos aos valores reais medidos na RMGV e conseguiu atingir mais indicadores estatísticos propostos pelo Emery, et al., (2001) é a modelagem M\_12 que corresponde à parametrização dos esquema UW para a CLA e MM5 do para a CLS. Na TABELA 8 é apresentado o resumo dos valores dos testes estatísticos realizados com esta parametrização para cada estação pertence a RAMQAR e o aeroporto.

TABELA 8: Resumo dos valores estatísticos para a modelagem M\_12 (esquema UW para a CLA e MM5 para a CLS.) para cada estação pertence a RMAQAr e o aeroporto para o período de inverno (07/2010).

Variável meteorológica	Estatístico	Índice	Estação				
			Carapina	Enseada do Suá	Ibes	Cariacica	Aeroporto
Velocidade do vento (10 m)	MB	$\pm 0,5$	1,61	0,44	0,14	0,63	0,27
	RMSE	$\leq 2,0$ m/s	2,00	1,40	1,12	1,29	1,91
	IOA	$\geq 0,6$	-0,87	0,13	0,27	0,12	0,11
	r	-	0,50	0,43	0,62	0,50	0,43
	Máximo (m/s)	-	7,83	7,17	6,80	6,41	7,43
	Mínimo (m/s)	-	0,13	0,02	0,02	0,04	0,04
Direção do vento (10 m)	MB	$\pm 10$	-2,21	5,64	12,63	N/A	-26,02
	MAGE	$\leq 30$ graus	39,97	56,64	61,96	N/A	56,52
	r	-	0,52	0,43	0,23	N/A	0,10
Temperatura (2 m)	MB	$\pm 0,5$ K	-0,52	N/A	N/A	0,14	-1,20
	MAGE	$\leq 2$ K	1,23	N/A	N/A	1,26	1,57
	IOA	$\geq 0,8$	0,93	N/A	N/A	0,91	0,88
	r	-	0,82	N/A	N/A	0,89	0,86
	Máximo (°C)	-	27,64	N/A	N/A	29,41	28,14
	Mínimo (°C)	-	15,14	N/A	N/A	17,37	15,50

Na tabela anterior pode se apreciar que a variável meteorológica melhor representada pelo modelo WRF com a parametrização com a que foi realizada a modelagem M\_12 para todas as estações de monitoramento pertencentes a RAMQAr e o aeroporto é a velocidade do vento, atingindo nos indicadores propostos pelo Emery, et al., (2001) nos valores dos resultados dos testes estatísticos MB para as estações Enseada do Suá, Ibes e o aeroporto (0,44; 0,14 e 0,27 respectivamente); RMSE para as estações Enseada do Suá, Ibes, Cariacica e o aeroporto (1,40; 1,12; 1,29 e 1,91 respectivamente) e conseguindo atingir também os valores dos indicadores propostos pelos autores Borge et al. (2008), Reboredo et al. (2014) e Zhang et al. (2014) nos valores dos testes estatísticos MB para as estações todas (Carapina = 1,61; Enseada do suá = 0,44; Ibes = 0,14 Cariacica = 0,63 e o aeroporto = 0,27) e RMSE para as estações Carapina e aeroporto (2,00 e 1,91 respectivamente), seguida pela temperatura superficial que conseguiu atingir nos indicadores propostos pelo Emery, et al., (2001) nos valores dos resultados dos testes estatísticos MB para a estação Cariacica (0,14), MAGE (Carapina = 1,23; Cariacica = 1,26 e o aeroporto = 1,57) e IOA (Carapina = 0,93; Cariacica = 0,91 e o aeroporto = 0,88) para as estações todas que apresentam a medição desta variável. A direção do vento é a variável meteorológica na qual o modelo apresentou menor acurácia na sua modelagem na M\_12, não conseguindo atingir os valores dos indicadores propostos pelo Emery, et

al., (2001) mas conseguindo ficar dentro das faixas de variação propostas pelos autores Borge et al. (2008), Reboredo et al. (2014) e Zhang et al. (2014) para esta variável.

Com o objetivo de ver o desempenho do modelo WRF simulando as variáveis meteorológicas medidas pelas diferentes estações de monitoramento presentes na RMGV na modelagem M\_12, que como se viu anteriormente foi a que apresentou valores simulados mais pertos dos valores reais medidos e logrou atingir um maior número de indicadores estatísticos propostos pelos diferentes autores, são apresentados os gráficos “soccer goal” para as variáveis meteorológicas avaliadas no período de inverno (FIGURA 27) com o fim de ver o comportamento destas para cada uma das estações pertences a RAMQAr e o aeroporto.

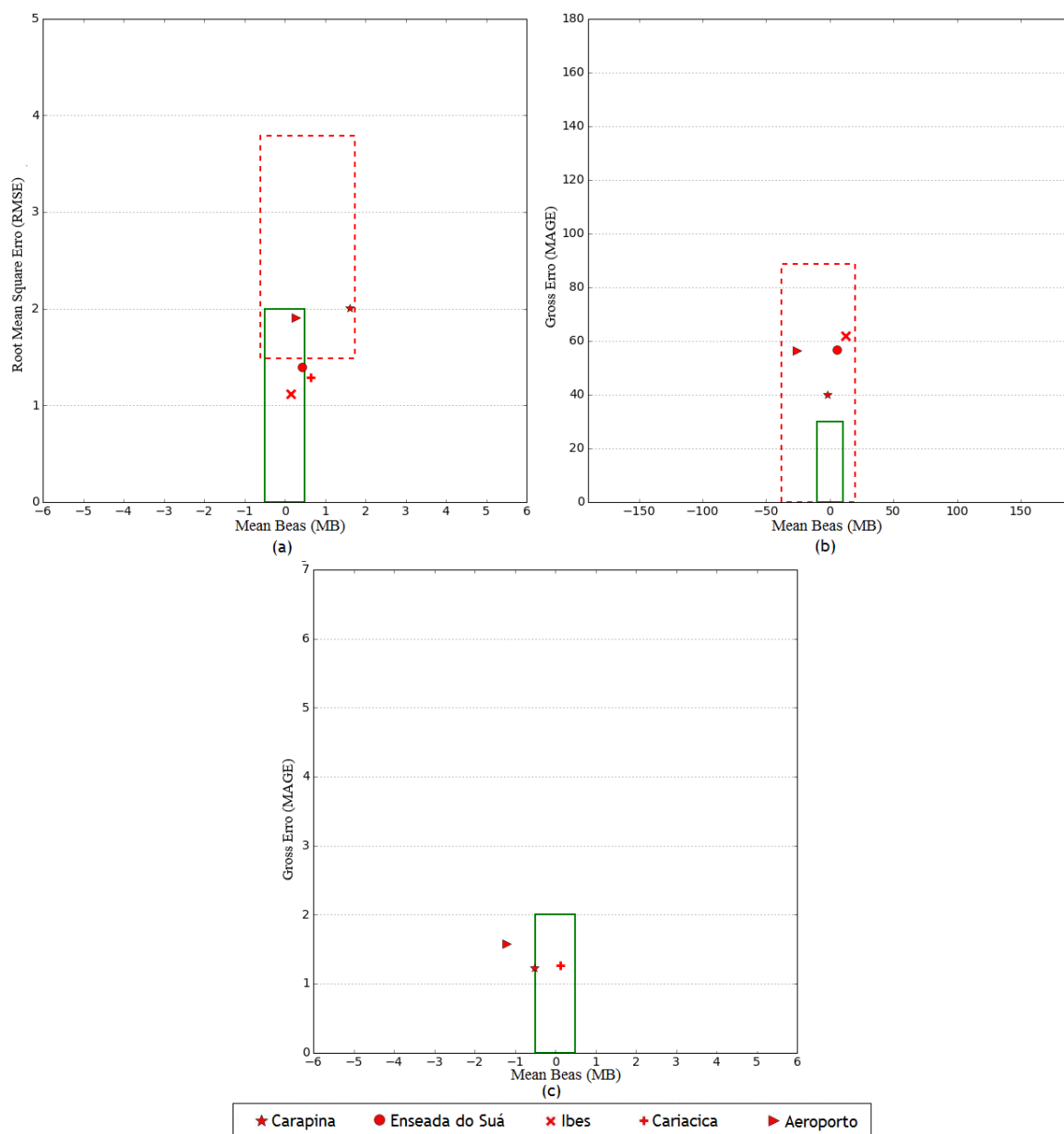


FIGURA 27: Gráfico soccer goal da: (a) Velocidade do vento (10 m), (b) direção do vento (10 m) e (c) temperatura superficial (2 m) para as estações de monitoramento pertencentes a RAMQAr e o aeroporto para a modelagem M\_12 (esquema UW para a CLA e MM5 para a CLS.) no período de inverno (07/2010) onde o polígono verde representa os critérios do Emery, et al., (2001) e o polígono vermelho representa os critérios dos autores Borge et al. (2008), Reboredo et al. (2014) e Zhang et al. (2014).

Observando a FIGURA 27 pode-se apreciar que os únicos valores que conseguiram atingir os indicadores estatísticos propostos pelo Emery, et al., (2001) foram a velocidade do vento para as estações Enseada do Suá, Ibes e aeroporto ( $MB = 0,44; 0,14$  e  $0,27$  e  $RMSE = 1,40; 1,12$  e  $1,91$



respectivamente) e a temperatura superficial para a estação Cariacica (MB = 0,14 e MAGE = 1,26). Pode-se ver que para a direção do vento nenhum dos valores modelados para as diferentes estações conseguiu atingir os valores dos indicadores propostos pelo Emery et al., (2001) mas pode-se ver também que o modelo consegue manter um erro aceitável na simulação desta variável já que segundo os resultados dos testes estatísticos feitos, os valores simulados para todas as estações onde é realizada a medição desta variável ficaram dentro das faixas de variação propostas pelos autores Borge et al. (2008), Reboredo et al. (2014) e Zhang et al. (2014). Para a velocidade do vento as estações que o modelo WRF conseguiu simular valores que atingiram os indicadores estatísticos propostos pelo Emery et al., (2001) para esta variável foram as estações Enseada do Suá, Ibes e o aeroporto (MB = 0,44; 0,14 e 0,27 e RMSE = 1,40; 1,12 e 1,91 respectivamente) e atingindo também os valores dos indicadores propostos pelos autores Borge et al. (2008), Reboredo et al. (2014) e Zhang et al. (2014) para as estações Carapina e o aeroporto, esta última atingindo os indicadores estatísticos propostos pelo Emery et al., (2001) como os propostos pelos demais autores.

A temperatura simulada pelo modelo WRF, que para sua avaliação só conta só com os indicadores propostos pelo Emery et al., (2001), mostrou que o modelo só conseguiu simular valores que atingiram os indicadores do MB e o MAGE para a estação Cariacica (0,14 e 1,26 respectivamente). Porém, os resultados dos testes estatísticos realizados para esta variável mostram que o modelo WRF conseguiu simular valores que atingiram os indicadores propostos para o MAGE e o IOA para as estações Carapina, Cariacica e o aeroporto (MAGE = 1,23; 1,26 e 1,57 e IOA = 0,93; 0,91 e 0,88 respectivamente), as quais são as únicas que apresentam medição desta variável.

Com o objetivo de avaliar a evolução diária das diferentes variáveis meteorológicas modeladas com o WRF e como é seu comportamento segundo os valores reais medidos, foram realizados os gráficos das séries temporais para a velocidade do vento e a temperatura superficial.

Na FIGURA 28 pode-se observar os diferentes gráficos que representam as series temporais da velocidade do vento da modelagem M\_12 para as diferentes estações pertences a RAMQAr e o aeroporto para julho de 2010.

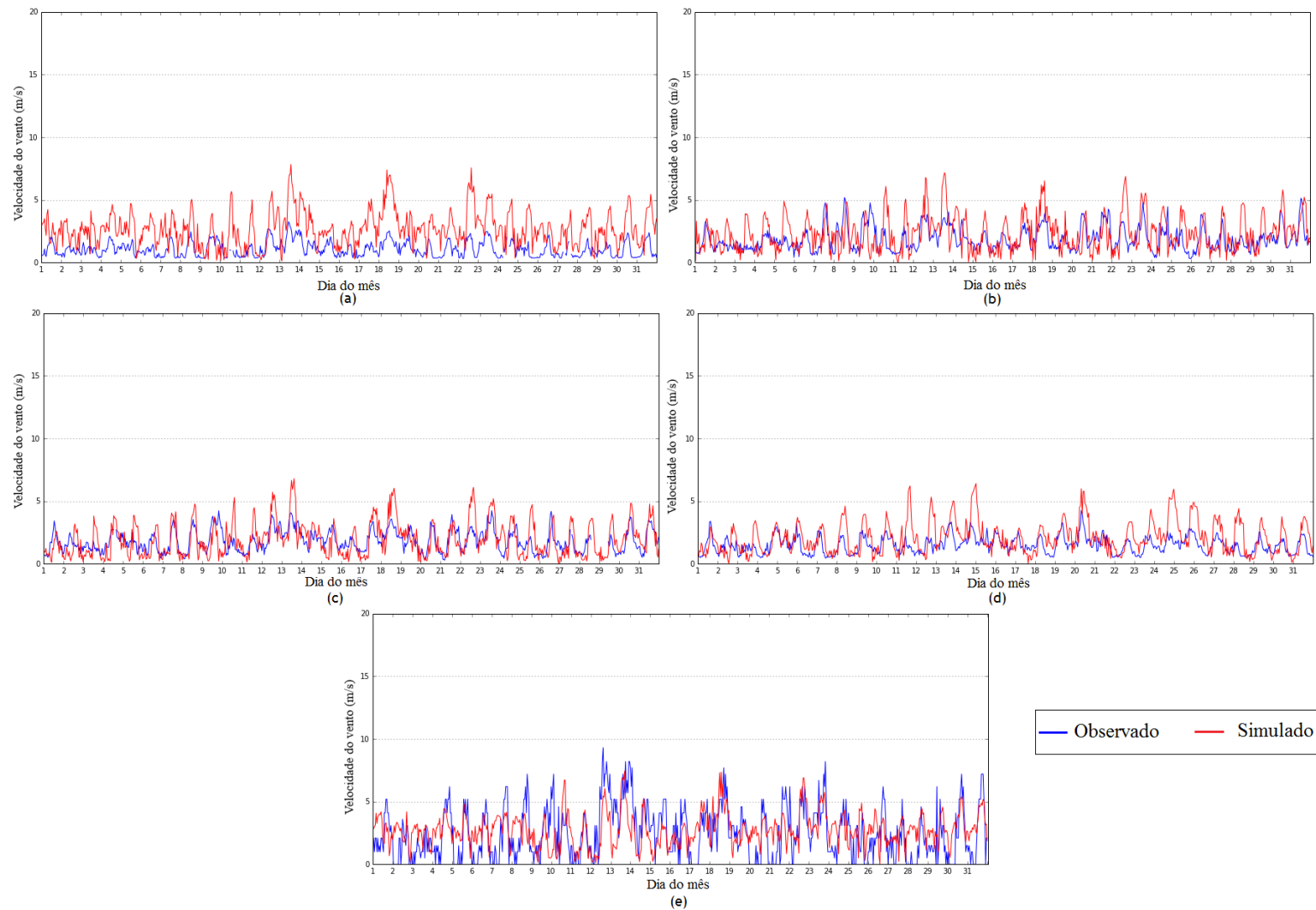
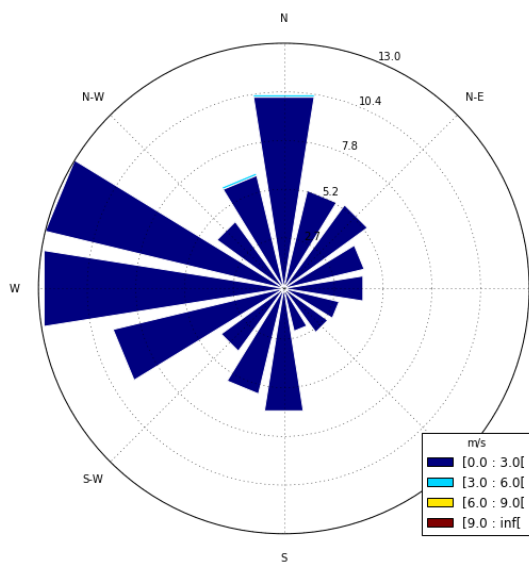


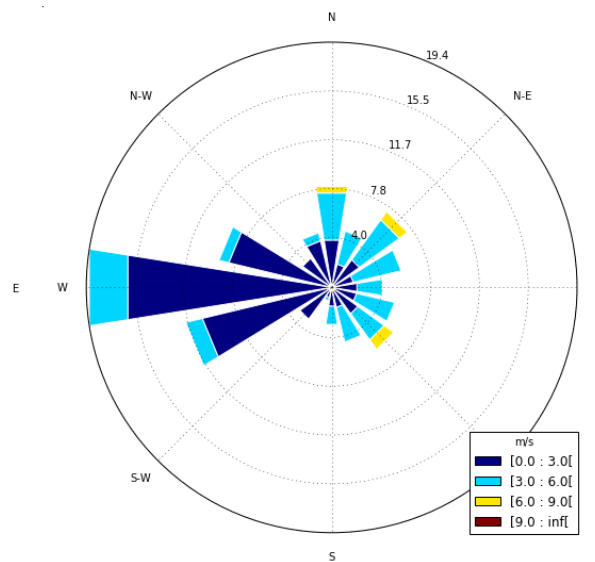
FIGURA 28: Série temporal da velocidade do vento (10 m) para as estações de monitoramento pertencentes a RAMQAr e o aeroporto: (a) Carapina, (b) Enseada do Suá, (c) Ibes, (d) Cariacica e (e) Aeroporto para a modelagem M\_12 (esquema UW para a CLA e MM5 para a CLS.) no período de inverno (07/2010) onde a linha de cor azul corresponde aos valores medidos nas diferentes estações e a linha vermelha corresponde aos valores simulados pelo modelo WRF.

Na figura anterior pode-se observar que para as estações Carapina, Enseada do Suá, Ibes e Cariacica, o modelo WRF superestima os valores extremos da velocidade do vento ao longo do mês, sendo a estação do aeroporto a que apresenta um resultado diferente às demais já que nesta estação os valores extremos desta variável são subestimados pelo modelo WRF. A estação que apresenta resultados simulados pelo WRF mais pertos aos valores reais medidos é a estação Ibes onde os valores modelados apresentam uma correlação positiva moderada de 0,62 com os valores medidos. Em geral a evolução mensal da velocidade do vento simulada pelo WRF para o mês de julho de 2010 representa, com uma boa acurácia, os valores desta variável o que concorda com os resultados dos diferentes gráficos “soccer goal” e tabelas onde a velocidade do vento é a variável meteorológica melhor representada atingindo em vários indicadores propostos na literatura pelo Emery et al. (2001) nos valores do MB para as estações Enseada do Suá, Ibes e o aeroporto (0,44; 0,14 e 0,27 respectivamente) e no RMSE para as estações Enseada do Suá, Ibes e Cariacica (1,40; 1,12 e 1,29 respectivamente) e nos indicadores propostos pelos autores Borge et al. (2008), Reboredo et al. (2014) e Zhang et al. (2014) nos valores do MB para todas as estações da RMGV analisadas (Cariacica = 1,61; Enseada do Suá = 0,44; Ibes = 0,14; Cariacica = 0,63 e aeroporto = 0,27) e do RMSE para as estações Carapina e o aeroporto (2,00 e 1,91 respectivamente).

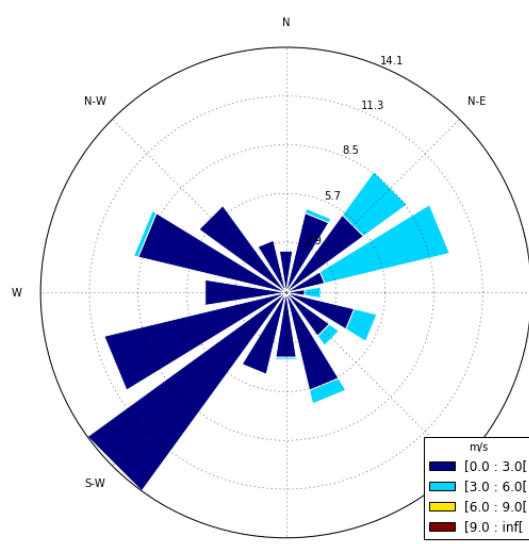
Na FIGURA 29 pode-se observar os diferentes gráficos que representam as rosas do vento mensais para as diferentes estações pertencentes a RAMQAr e o aeroporto da modelagem M\_12 no mês de julho.



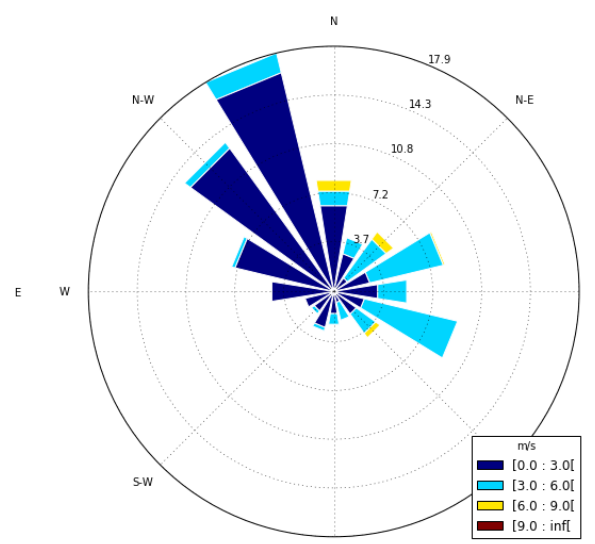
(a)



(b)



(c)



(d)

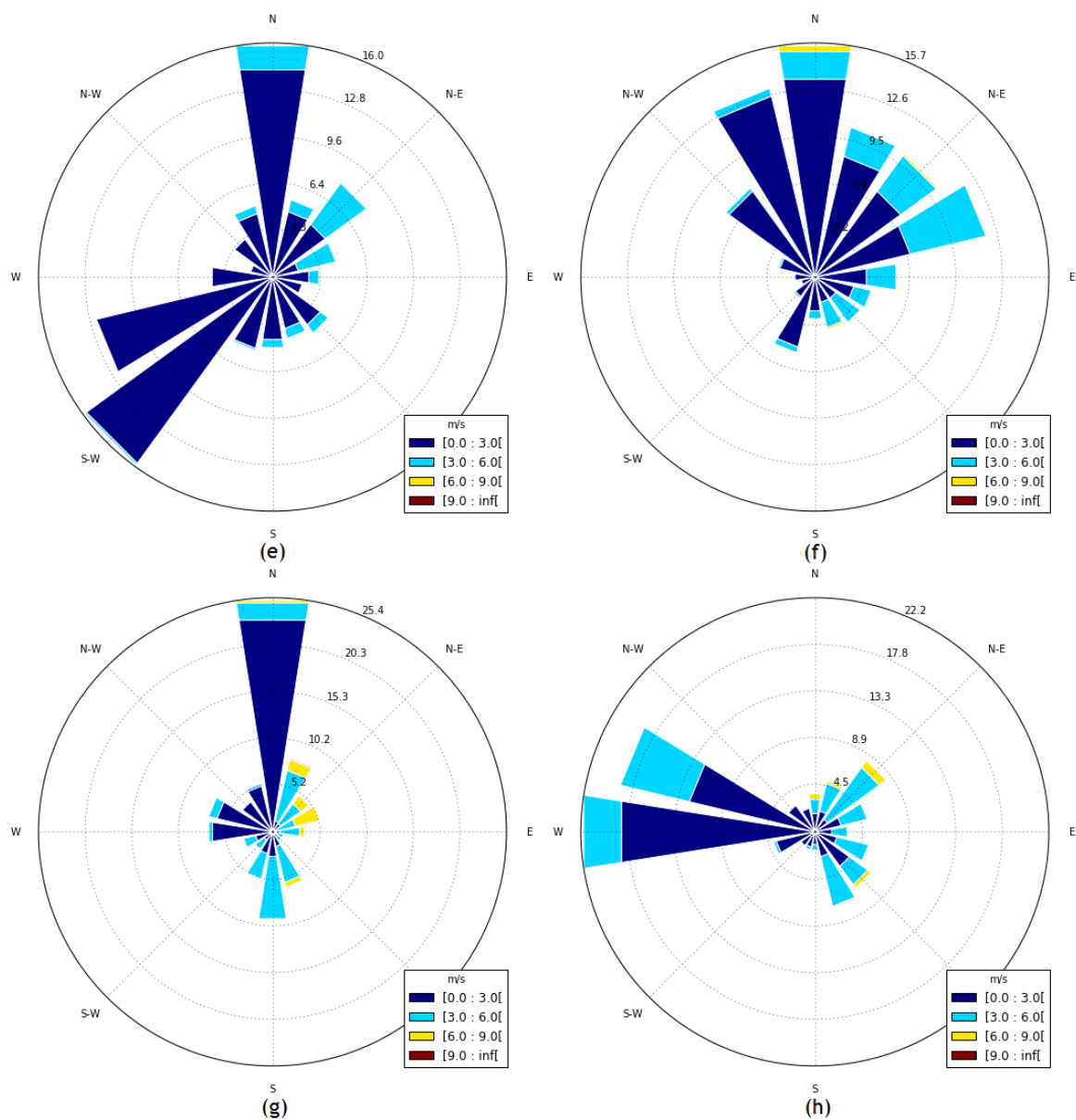


FIGURA 29: Rosas do vento para a direção do vento (10 m) para as estações de monitoramento pertencentes a RAMQAr e o aeroporto: (a e b) Carapina, (c e d) Enseada do Suá (e e f) Ibes e (g e h) Aeroporto para a modelagem M\_12 (esquema UW para a CLA e MM5 para a CLS.) no período de inverno (07/2010) onde a as rosas da esquerda (a, c, e e g) representam as rosas realizadas com os dados reais medidos e as rosas da direita (b, d, f e h) representam as rosas do vento realizadas com os dados simulados pelo modelo WRF para as diferentes estações.

Na figura anterior pode-se ver que a maioria das rosas de vento realizadas com os dados simulados pelo modelo WRF apresentam claras diferenças com as rosas de vento realizadas com os dados reais medidos nas diferentes estações de monitoramento. Para a estação Carapina (gráficos a e b) pode-se observar que os dados reais medidos nesta estação a direção do vento tem duas direções predominantes do vento quase com a mesma frequência no número de dados (13%) nas direções oeste [W] ( $270^\circ$ ) e oeste-noroeste [ONO] ( $292,5^\circ$ ), valores que para a rosa do vento para os dados simulados pelo WRF só tem similitude na direção do vento predominante na direção W ( $270^\circ$ ) com uma frequência de 19,4% dos valores simulados; para a estação Enseada do Suá (gráficos c e d) pode-se observar que na rosa dos ventos realizada com os dados reais medidos, com uma frequência de 14,1% dos dados totais, a direção predominante do vento sudoeste [SW] ( $225^\circ$ ) e para os dados simulados é nordeste-noroeste [NNO] ( $337,5^\circ$ ), com uma frequência de 17,9% dos dados totais; para a estação Ibes os dados reais apresentam duas direções predominantes do vento as quais são SW ( $225^\circ$ ) e N ( $0^\circ$ ) com frequências de aproximadamente 16% do total dos dados enquanto para a direção do vento predominante para os dados simulados, com uma frequência de 15,5% do total dos dados, é NNO ( $337,5^\circ$ ) e para a estação do aeroporto, com 25,4% dos dados totais, a direção predominante do vento é N ( $0^\circ$ ) e para os dados simulados é W ( $270^\circ$ ) com 21,6% do total dos dados. Os gráficos apresentados anteriormente mostram que, falado também na análise das diferentes séries temporais para a velocidade do vento, que o modelo WRF superestima a maioria dos valores da velocidade para as estações todas da RMAQr e o aeroporto. Porém, na maioria das simulações realizadas apresentem grandes diferenças nas direções predominantes do vento para as diferentes estações pertencentes a RAMQAr e o aeroporto, nas outras direções o modelo consegue simular com um erro aceitável o que tem concordância com o apresentado nos diferentes gráficos soccer goal e na TABELA 7 onde os resultados dos testes estatísticos realizados conseguem atingir os indicadores propostos pelos Emery et al., (2001) no MB para as estações de Carapina e Enseada do Suá (-2,21 e 5,64 respectivamente) e os valores do MB e o MAGE para todas as estações analisadas ficaram dentro das faixas de variação obtidas pelos autores Borge et al. (2008), Reboredo et al. (2014) e Zhang et al. (2014).

Na FIGURA 30 pode-se observar os diferentes gráficos que representam as séries temporais da temperatura superficial da modelagem M\_12 para as diferentes estações pertencentes a RAMQAr e o aeroporto para julho de 2010.

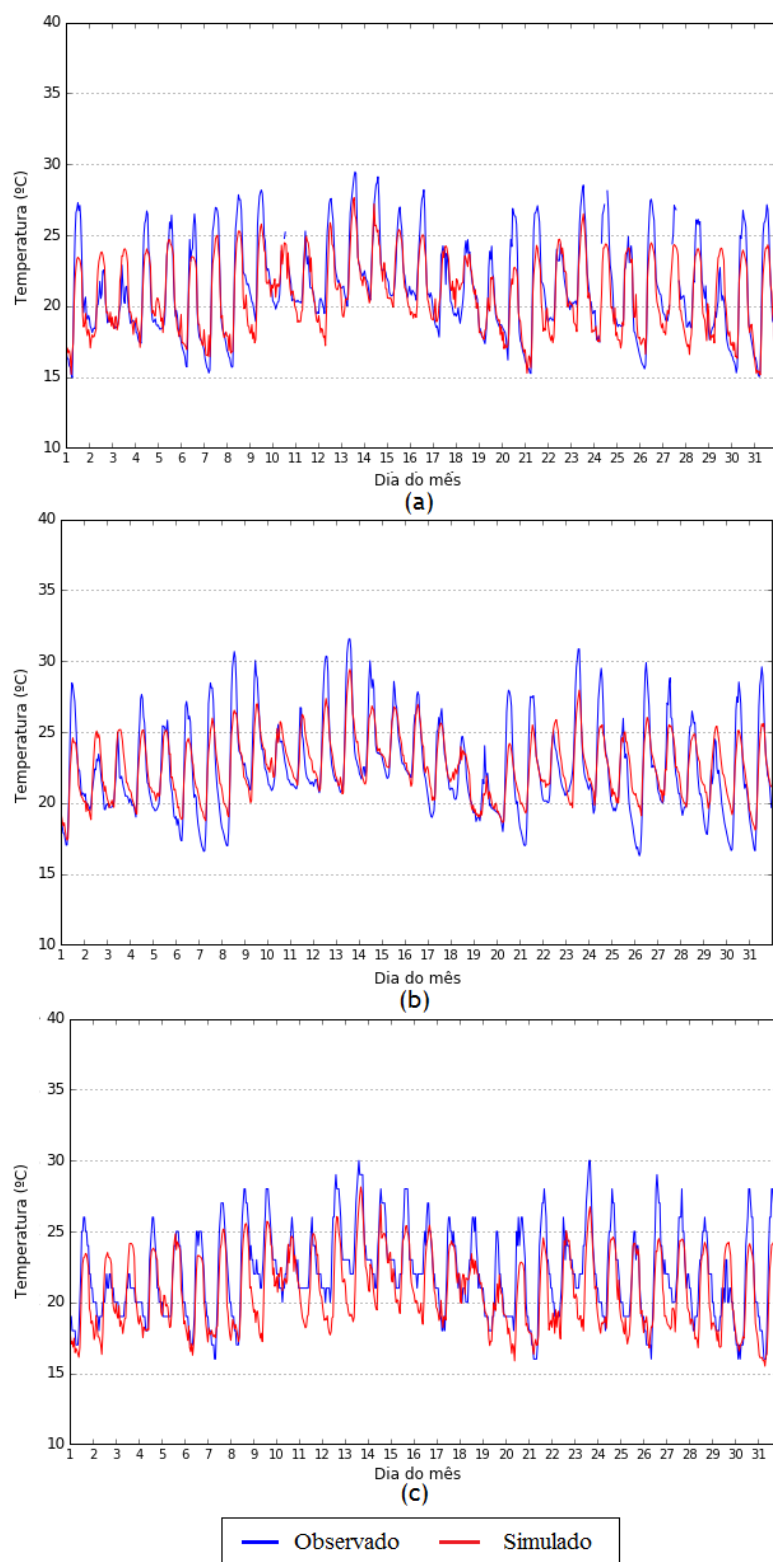


FIGURA 30: Série temporal da temperatura superficial (2 m) para as estações de monitoramento pertencentes a RAMQAr e o aeroporto: (a) Carapina, (b) Cariacica e (c) Aeroporto para a modelagem M\_12 (esquema UW para a CLA e MM5 para a CLS.) no período de inverno (07/2010) onde a linha de cor azul corresponde aos valores medidos nas diferentes estações e a linha vermelha corresponde aos valores simulados pelo modelo WRF.

Na figura anterior pode-se observar que a temperatura simulada pelo modelo WRF subestima os valores extremos desta variável ao longo do mês de julho todo. Em geral a correlação que apresentam os valores simulados com os valores modelados é uma correlação positiva forte, sendo a estação Cariacica a que apresenta uma maior correlação, seguida da estação Carapina e a estação do aeroporto ( $r = 0,89$ ;  $0,86$  e  $0,82$  respectivamente); tendo concordância com os diferentes gráficos “soccer goal” y tabelas onde os dados simulados pelo WRF conseguiram simular com um erro aceitável os valores reais medidos em cada estação analisada da RMGV atingindo nos indicadores propostos pelo Emery et al. (2001) no valor do MB para a estação Carapina ( $0,14$ ) e no IOA e MAGE para todas as estações analisadas da RMGV.



## 6. CONCLUSÕES

O objetivo principal deste estudo foi avaliar o desempenho de algumas parametrizações físicas da CLA disponíveis no modelo WRF 3.6.1. Para atingir dito objetivo foram realizadas 34 simulações avaliando todas as parametrizações da CLA com suas respectivas parametrizações da CLS para os meses de fevereiro e julho. Através destas simulações foi possível observar e analisar o desempenho de cada parametrização em representar as variáveis meteorológicas de temperatura do ar, velocidade e direção do vento em uma região costeira como a RMGV.

Através da aplicação dos parâmetros estatísticos entre os dados simulados e monitorados em superfície, foi possível observar que representar acuradamente as variáveis meteorológicas não é uma função fácil para os modelos meteorológicos, principalmente devido a RMGV apresenta características climáticas e topográficas complexas.

Por este motivo, e com o objetivo de ter dados que fossem representativos o ano todo nesta região, as modelagens realizadas nesta dissertação foram feitas para os meses de fevereiro e julho os quais pertencem aos períodos de verão e inverno respectivamente.

Os resultados obtidos para o mês de fevereiro de 2010 mostraram que a parametrização que melhor representou as variáveis meteorológicas estudadas foi simulação realizada com os esquemas YSU para a CLA e a MM5 melhorado para a CLS. Os resultados simulados pelo WRF para a velocidade do vento (10 m) nesta modelagem atingiram os indicadores estatísticos propostos pelo Emery et al. (2001) no MB para as estações Enseada do Suá e Ibes; RMSE para as estações Carapina, Enseada do Suá, Ibes e Cariacica e IOA para a estação Ibes; para a direção do vento atingiu nos índices MB para as estações Carapina e Ibes e no MAGE para estação Carapina e para a temperatura superficial

atingiu no MAGE para as estações de Carapina e Cariacica e no IOA para as estações Carapina, Cariacica e o aeroporto e para a temperatura superficial no MAGE para as estações Carapina e Cariacica e no IOA para todas as estações analisadas e ficaram dentro das faixas de variação obtidas pelos autores Borge et al. (2008), Reboredo et al. (2014) e Zhang et al. (2014) na velocidade do vento no MB para todas as estações da RMGV e no RMSE para as estações Carapina, Enseada do Suá, Cariacica e aeroporto; na direção do vento no MB e no MAGE para todas as estações analisadas.

As análises estatísticas mostraram que a estação Carapina foi a melhor representada pela modelagem M\_1, utilizando os esquemas YSU para a CLA e a MM5 melhorado para a CLS; estação onde os valores simulados pelo WRF conseguiram atingir a maior quantidade de indicadores estatísticos propostos pelos autores do Emery, et al., (2001), Borge et al. (2008), Reboredo et al. (2014) e Zhang et al. (2014) em comparação com as outras estações. Por outro lado, a estação para a que os valores simulados pelo modelo apresentou menor acurácia com respeito aos valores medidos foi a estação do aeroporto. Embora nesta estação os valores simulados atingiram os indicadores propostos pelo Emery et al. (2001) no IOA da temperatura superficial ficaram dentro das faixas de variação obtidas pelos autores Borge et al. (2008), Reboredo et al. (2014) e Zhang et al. (2014) no MB e RMSE para a velocidade do vento e no MB e o MAGE para a direção do vento.

Por outro lado, os resultados obtidos para o mês de julho mostraram que a parametrização que melhor representa os valores da temperatura do ar, a velocidade e a direção do vento para o período de inverno na RMGV, é a parametrização com a que foi realizada a modelagem M\_12 que corresponde aos esquemas UW para a CLA e a MM5 para a CLS. Os valores simulados pelo WRF para a velocidade do vento nesta modelagem atingiram os indicadores estatísticos propostos pelo Emery et al. (2001) no MB para as estações Enseada do Suá, Ibes e aeroporto e RMSE para as estações Enseada do Suá, Ibes, Cariacica e o aeroporto; para a direção do vento atingiu nos índices MB para as estações Carapina e Enseada do Suá e para a temperatura superficial atingiu no MB para a estação Cariacica e no MAGE e IOA para Carapina, Cariacica e o aeroporto e os indicadores propostos pelos autores Borge et al. (2008), Reboredo et al. (2014) e Zhang et al. (2014) na velocidade do vento no MB para todas as estações da RMGV e no RMSE para as estações Carapina e aeroporto e na direção do vento no MB e no MAGE para todas as estações analisadas.

As análises estatísticas realizadas mostraram que das estações pertencentes a RMAQAr e o aeroporto, as que são melhor representadas na modelagem M\_12 no período de inverno são Cariacica e o aeroporto. Estas estações atingiram a maior quantidade de indicadores estatísticos propostos pelo

Emery et al. (2001) em comparação com as outras estações (RMSE para a velocidade do vento, MB e MAGE e IOA para a temperatura superficial para Cariacica e MB e RMSE para a velocidade do vento e MAGE e IOA para a temperatura superficial para o aeroporto). Por outro lado, a estação para a que o modelo apresentou menor acurácia com respeito aos valores medidos foi a estação Ibes, atingindo os indicadores MB e RMSE para a velocidade do vento.

Diante os resultados e análises apresentados ao longo deste documento, chega-se à conclusão que as parametrizações que melhor representaram os valores da temperatura do ar, a velocidade e a direção do vento na RMGV foram com as que foram realizadas a modelagem M\_1 que corresponde aos esquemas YSU para a CLA e a MM5 melhorado para a CLS, para o período de verão e a modelagem M\_12 que corresponde aos esquemas UW para a CLA e a MM5 para a CLS, para o período de inverno. Ambas modelagens apresentam melhores resultados na representação da velocidade do vento, seguida da temperatura superficial e a direção do vento. Uma das possíveis razões para que a modelagem M\_1 apresentara o melhor desempenho na simulação das variáveis meteorológicas com o modelo WRF para o verão é o fato de que a parametrização YSU para a CLA apresenta uma inclusão no tratamento explícito dos processos de entranhamento na parte superior da CLA o que é melhor para uma região costeira como a RMGV onde a altura da CLA é menor que em regiões onde não tem a influência da brisa marítima. Já no período de inverno, uma das possíveis razões para que a modelagem M\_12 apresentara o melhor desempenho na simulação das variáveis meteorológicas com o modelo WRF é o fato de que a parametrização UW da CLA conta com o objetivo principal é melhorar o tratamento físico da camada limite marinha em lugares com presença de estrato-cumulus o que ajuda a simular melhor os valores das variáveis meteorológicas avaliadas numa região como a RMGV que está diretamente influenciada pela presença do mar e a brisa marinha.

## 7. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tendo como resultado desta dissertação as parametrizações da CLA, com sua respectiva parametrização da CLS, que melhor representam os valores reais da temperatura superficial, velocidade e direção do vento em dois meses que pertencem aos períodos estacionais mais representativos da RMGV, fevereiro de 2010 para o período de verão e julho do mesmo ano para período de inverno (modelagens M\_1 que corresponde aos esquemas YSU para a CLA e MM5 melhorado para a CLS e M\_12 que corresponde à parametrização dos esquema UW para a CLA e MM5 do para a CLS), recomenda-se para trabalhos futuros:

- Realizar a revisão teórica e posteriores simulações nas quais sejam utilizadas as outras parametrizações físicas com as que conta o modelo WRF (microfísica, cumulus, camada superficial do solo e radiação) com o fim de melhorar os resultados das predições das variáveis meteorológicas para a RMGV e assim posteriormente ter melhores resultados no momento de utilizar estes dados em modelos de dispersão.
- Realizar novos testes com versões mais recentes do modelo WRF já que estas incluem novas parametrizações que podem ser de ajuda para ter resultados mais precisos.
- Realizar um controle de qualidade dos dados observados do 2010 e anos posteriores com o fim de descartar dados meteorológicos errôneos e poder-se utilizar dados mais recentes para as simulações.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

, NASA; , NGA; , USGS;, s.f. *WebGIS*. [En línea]  
Available at: <http://www.webgis.com/srtm30.html>

A. A. H., E. I. F. d. B. & H.-L. P., 1990. A High Resolution Air Mass Transformation Model for Short-Range Weather Forecasting. *Monthly Weather Review*, Volumen 118, pp. 1561-1575.

American Meteorological Society, 2012. *Meteorology Glossary*. [En línea]  
Available at: <http://glossary.ametsoc.org/wiki/Thermals>  
[Último acceso: 2016 05 18].

Angevine, W. M., Jiang, H. & Mauritsen, T., 2010. Performance of an Eddy Diffusivity–Mass Flux Scheme for Shallow Cumulus Boundary Layers. *Monthly Weather Review* , Volumen 138, pp. 2895-2912.

Banks, R. F. y otros, 2016. Sensitivity of boundary-layer variables to PBL schemes in the WRF model based on surface meteorological observations, lidar, and radiosondes during the HygrA-CD campaign. *Atmospheric Research*, p. 185–201.

Bernardes, M., s.f. *Conceitos de estabilidade atmosférica e dispersão atmosférica*, Curitiba: s.n.

Betts, A. K., 1972. Non-precipitating cumulus convection and its parameterization. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, pp. 178-196.

Blackadar, A. K., 1962. The Vertical Distribution of Wind and Turbulent Exchange in a Neutral Atmosphere. *Journal Of Geophysical Research* , 67(8), pp. 3095-3102.

Boligon Minuzzi, R., Chohaku Sediya, G., Nogueira da Costa, J. M. & Leite Vianello, R., 2007. Influência da La Niña na estação chuvosa da região sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 22(3), pp. 345-353.

Bougeault, P. & Lacarrere , P., 1989. Parameterization of Orography-Induced Turbulence in a Mesobeta-Scale Model. *Monthly Weather Review*, Volumen 117, pp. 1872-1890.

Bretherton, C. S. & Park, S., 2008. A New Moist Turbulence Parameterization in the Community Atmosphere Model. *Journal Of Climate* , Volumen 22, pp. 3422-3448.

C. Skamarock, W. y otros, 2008. *A Description of the Advanced Research WRF Version 3*, s.l.: s.n.

Climate And Global Dynamics Division National Center For Atmospheric Research ; Polar Science Center ; Geophysical Fluid Dynamics Laboratory ; Institute For Terrestrial And Planetary Atmospheres Stony Brook University, 2004. *Description of the NCAR Community Atmosphere Model (CAM 3.0)*, Colorado: s.n.

Climate And Global Dynamics Division National Center For Atmospheric Research et al., 2010. *Description of the NCAR Community Atmosphere Model (CAM 5.0)* , s.l.: s.n.

Cohen, A. E., Cavallo, S. M., Coniglio , M. C. & Brooks, H. E., 2015. A Review of Planetary Boundary Layer Parameterization Schemes and Their Sensitivity in Simulating Southeastern U.S. Cold Season Severe Weather Environments. *Weather And Forecasting*, Volumen 30, pp. 591-612.

COMET, s.f. *Influence de la Physique des Modèles sur la Prévision Numérique du Temps*. [En línea]

Available at: [https://www.meted.ucar.edu/nwp/model\\_physics\\_es/print.htm#page\\_4.0.0](https://www.meted.ucar.edu/nwp/model_physics_es/print.htm#page_4.0.0)  
[Último acceso: 2016 06 21].

Correia de Marchi, A. y otros, 2009. *Avaliação da sensibilidade da parametrização de Camada Limite Planetária para estimativa do campo de vento em Alagoas*, Alagoas: s.n.

Dudhia, J., 1989. Numerical Study of Convection Observed during the Winter Monsoon Experiment Using Mesoscale Two-Dimensional Model. *Journal of The Atmospheric Sciences* , 46(20), pp. 3077-3107.

Emery, C., Tai, E. & Yarwood , G., 2001. *Enhanced Meteorological Modeling And Performance Evaluation For Two Texas Ozone Episodes*, Novato, CA: s.n.

Emery, C., Tai, E. & Yarwood, G., 2001. *Enhanced Meteorological Modeling And Performance Evaluation For Two Texas Ozone Episodes*, Novato, CA: s.n.

EPA, 2014. *Modeling Guidance for Demonstrating Attainment of Air Quality Goals for Ozone, PM2.5, and Regional Haze*, s.l.: s.n.

Fels, S. B. & Schwarzkopf, M. D., 1981. An efficient, Accurate Algorithm for Calculating CO<sub>2</sub> 15 um Band Cooling Rates. *Journal of Geophysical Research*, 86(C2), pp. 1205-1232.

- Ferreira, F. C., 2014. *A Produção Imobiliária e a Renda da Terra: Estudo de alguns casos na Região Metropolitana da Grande Vitória*, Vitória: s.n.
- Gacek, Z. K., 2014. *Modeling Night time Chemistry With WRF/Chem: Sensitivity To Vertical Resolution And Boundary Layer Parameterization*, Illinois: s.n.
- Galperin, B., Kantha, L. H., Hassid, S. & Rosati, A., 1988. A Quasi-equilibrium Turbulent Energy Model for Geophysical Flows. *Journal Of The Atmospheric Sciences*, 45(1), pp. 55-62.
- Gerrity Jr., J. P. & Black, T. L., 1994. The Numerical Solution of the Mellor Yamada Level 2.5 Turbulent Energy Equation in the Eta Model. *monthly Weather Review*, Volumen 122, pp. 1640-1646.
- Gilmore, M. S., Straka, J. M. & Rasmussen, E. N., 2004. Precipitation Uncertainty Due to Variations in Precipitation Particle Parameters within a Simple Microphysics Scheme. *Monthly Weather Review*, Volumen 132, pp. 2610-2627.
- Grell, G. A., 1993. Prognostic Evaluation of Assumptions Used by Cumulus Parameterizations. *Monthly Weather Review*, Volumen 121, pp. 764-787.
- Grell, G. A. & Dévényi, D., 2012. A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophysical Research Letters*, 29(14), pp. 38-41.
- Grell, G. A. & Freitas, S. R., 2013. A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling. *Atmospheric Chemistry and Physics*, pp. 23845-23893.
- Grell, G. A. y otros, 2005. Fully coupled “online” chemistry within the WRF model. *Atmospheric Environment*, p. 6957–6975.
- Grenier, H. & Bretherton, C. S., 2001. A Moist PBL Parameterization for Large-Scale Models and Its Application Subtropical Cloud-Topped Marine Boundary Layers. *Monthly Weather Review*, Volumen 129, pp. 357-377.
- Gu, Y., Liou, K. N., Ou, S. C. & Fovell, R., 2011. Cirrus cloud simulations using WRF with improved radiation parameterization and increased vertical resolution. *Journal of Geophysical Research*, Volumen 116, pp. 2139-2156.

Hailey Shin, H. & Hong, S.-Y., 2011. Intercomparison of Planetary Boundary-Layer Parametrizations in the WRF Model for a Single Day from CASES-99. *Springer Science+Business Media B.V*, Issue 139, p. 261–281.

Han, J. & Pan, H.-L., 2011. Revision of Convection and Vertical Diffusion Schemes in the NCEP Global Forecast System. *Weather And Forecasting*, Volumen 26, pp. 520-533.

Hong, S.-Y., Dudhia, J. & Chen, S.-H., 2004. A Revised Approach to Ice Microphysical Processes for the Bulk Parameterization of Clouds and Precipitation. *Monthly Weather Review*, Volumen 132, pp. 103-120.

Hong, S.-Y. & Jade Lim, J.-O., 2006. The WRF Single-Moment 6-Class Microphysics Scheme (WSM6). *Journal of the Korean Meteorological Society*, 42(2), pp. 129-151.

Hong, S.-Y. & Pan, H.-L., 1996. Nonlocal Boundary Layer Vertical Diffusion in a Medium-Range Forecast Model. *Monthly Weather Review*, Volumen 124, pp. 2322-2339.

Hong, S.-Y., Noh, Y. & Dudhia, J., 2005. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Monthly Weather Review*, Volumen 134, pp. 2318-2341.

Iacono, M. J. y otros, 2008. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *Journal of Geophysical Research*, Volumen 113, pp. 1-8.

IEMA, 2013. *Relatório da qualidade do Ar - Grande Vitória*, Vitória: s.n.

IEMA, 2014. *Relatorio da Qualidade do Ar - Grande Vitória*, Vitória: s.n.

Instituto de Pesquisa e Econômica Aplicada, 2010. *IPEA*. [En línea] Available at: [http://ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/livros/livros/141125\\_atlas\\_vitoria](http://ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/livros/livros/141125_atlas_vitoria)

Instituto Jones dos Santos Neves (IJSN), 2008. *Região Metropolitana Da Grande Vitória - Perfil Regional*. s.l., s.n.

Instituto Jones dos Santos Neves, 2011. [En línea] Available at: <http://www.ijsn.es.gov.br/mapas/>

Janjic, Z. I., 1993. The surface layer in the NCEP Eta model. *Américan Meteorological Society*.

Janjic, Z. I., 1994. The Step-Mountain Eta Coordinate Model: Further Developments of the Convection, Viscous Sublayer, and Turbulence Closure Schemes. *Monthly Weather Review*, Volumen 122, pp. 927-945.



- Jiménez, P. A. y otros, 2011. A Revised Scheme for the WRF Surface Layer Formulation. *Monthly Weather Review*, Volumen 140, pp. 300-316.
- Kaimal, J. C. & Finnigan, J. J., 1994. *Atmospheric Boundary Layer Flows: Their Structure and Measurement*. New York: Oxford University Press.
- Kain, J. S., 2004. The Kain–Fritsch Convective Parameterization: An Update. *Journal Of Applied Meteorology*, Volumen 43, pp. 170-181.
- Kain, J. S. & Fritsch, J. M., 1990. A One-Dimensional Entraining/Detraining Plume Model and Its Application in Convective Parameterization. *Journal Of The Atmospheric Sciences*, 47(23), pp. 2784-2802.
- Khain, A., Lynn, B. & Dudhia, J., 2010. Aerosol Effects on Intensity of Landfalling Hurricanes as Seen from Simulations with the WRF Model with Spectral Bin Microphysics. *Journal Of The Atmospheric Sciences*, Volumen 67, pp. 365-384.
- Khain, A. y otros, 2004. Simulation of Effects of Atmospheric Aerosols on Deep Turbulent Convective Clouds Using a Spectral Microphysics Mixed-Phase Cumulus Cloud Model. Part I: Model Description and Possible Applications.. *Journal Of The Atmospheric Sciences*, Volumen 61, pp. 2963-2982.
- Kim, J., 1991. *Turbulent and Gravity Wave Transport in the Free Atmosphere*, Oregon : s.n.
- Lehner, M., 2012. *Extracting terms of the horizontal momentum and thermodynamic equations in the WRF model code*, Salt Lake : s.n.
- Lin, Y. & Colle, B. A., 2011. A New Bulk Microphysical Scheme That Includes Riming Intensity and Temperature-Dependent Ice Characteristics. *Monthly Weather Review*, Volumen 139, pp. 1013-1035.
- Lin, Y.-L., Farley, R. D. & Orville , H. D., 1983. Bulk Parameterization of the Snow Field in a Cloud Model. *Journal Of Climate and Applied Meteorology*, Volumen 22, pp. 1065-1092.
- Londoño, C. A. E., 2011. *Contaminación atmosférica*. Medellín : s.n.
- M.D. et all. Climent, 1992. *Conocer la química del medio ambiente: la Atmosfera*. Valencia: Universidad Politécnica De Valencia. Servicio De Publicacion.
- M.Tiedtke, 1989. A Comprehensive Mass Flux Scheme for Cumulus Parameterization in Large-Scale Models. *Monthly Weather Review* , Volumen 117, pp. 1779-1800.

Magnago, R., Fisch, G. & Moraes, O., 2010. Análise espectral do vento no centro de lançamento de Alcântara (CLA). *Revista Brasileira de Meteorologia*, 25(2), pp. 260-269.

Mansell, E. R. & Ziegler, C. L., 2010. Simulated Electrification of a Small Thunderstorm with Two-Moment Bulk Microphysics. *Journal Of The Atmospheric Sciences*, Volumen 67, pp. 171-194.

Mauritsen, T. y otros, 2007. A Total Turbulent Energy Closure Model for Neutrally and Stably Stratified Atmospheric Boundary Layers. *Journal Of The Atmospheric Sciences*, Volumen 64, pp. 4113-4126.

Mesoscale & Microscale Meteorology Division; National Center for Atmospheric Research, 2015. *WRF users page*. [En línea] Available at: [http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user\\_guide\\_V3/users\\_guide\\_chap5.htm#fields](http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/users_guide_chap5.htm#fields)

Milbrandt, J. A. & Yau, M. K., 2005. A Multimoment Bulk Microphysics Parameterization. Part II: A Proposed Three-Moment Closure and Scheme Description. *Journal Of The Atmospheric Sciences*, Volumen 62, pp. 3065-3081.

Mitchell, K., 2005. *The Community Noah Land-surface Model (LSM)*, s.l.: s.n.

Mlawer, E. J. y otros, 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research*, 102(D14), pp. 16663-16682.

Moraes, O. L. L. d., 2010. *Meteorologia e poluição atmosférica: Teoría, Experimentos e simulação*. Santa María: Facos-UFSM.

Morrison, H., Thompson, G. & Tatarskii, V., 2009. Impact of Cloud Microphysics on the Development of Trailing Stratiform Precipitation in a Simulated Squall Line: Comparison of One- and Two-Moment Schemes. *Monthly Weather Review*, Volumen 137, pp. 991-1007.

Nakanishi, M. & Niino, H., 2006. An Improved Mellor–Yamada Level-3 Model: Its Numerical Stability And Application To A Regional Prediction Of Advection Fog. *Boundary-Layer Meteorology*, Volumen 119, pp. 397-407.

Nakanishi, M. & Niino, H., 2009. Development of an Improved Turbulence Closure Model for the Atmospheric Boundary Layer. *Meteorological Society of Japan*, 87(5), pp. 895-912.

NASA, 1999. *A Solar Radiation Parametrization for Atmospheric Studies*, Greenbelt: s.n.

National Center for Atmospheric Research, 2015. *ARW Version 3 Modeling System User's Guide*. s.l.:s.n.

National Oceanic and Atmospheric Administration, 2000. *National Weather Service*. [En línea] Available at: <http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/mmbpll/eta12tpb/> [Último acceso: 25 5 2016].

National Oceanic and Atmospheric Administration, s.f. *Weather Prediction Center - National Weather Service*. [En línea] Available at: <http://www.wpc.ncep.noaa.gov/international/training/deep/sld001.htm> [Último acceso: 27 07 2016].

Navidi, W., 2006. *Estadística para ingenieros y científicos*. Colorado: Mc Graw Hill.

Nevers, N. d., 1995. *Air Pollution Control Engineering*. Singapore: Mc Graw-Hill.

Nieves Hurtado, A. & Domínguez Sánchez, F. C., 2010. *Probabilidad y Estadística para la Ingeniería: Un Enfoque Moderno*. s.l.:McGraw-Hill.

NOAA, s.f. *National Oceanic and Atmospheric Administration's*. [En línea] Available at: <http://www.nws.noaa.gov/glossary/index.php?letter=c> [Último acceso: 17 05 2016].

Oleson, K. W. y otros, 2010. *Technical Description of version 4.0 of the Community Land*, Colorado: s.n.

Olson, J. & Brown, J. M., 2012. *Modifications to the MYNN PBL and Surface Layer Scheme for WRF-ARW*, s.l.: s.n.

Pan, H.-L. & Wu, W.-S., 1995. *Implementing A Mass Flux Convection Parameterization Package For The NMC Medium-Range Forecast Model*. s.l., s.n.

Pedruzzi, R., 2016. *Avaliação de desempenho do modelo fotoquímico CMAQ utilizando diferentes condições de contorno em uma região urbana e industrializada*, Virória: s.n.

Pleim, J. E., 2006. A Combined Local and Nonlocal Closure Model for the Atmospheric Boundary Layer. Part I: Model Description and Testing. *Journal Of Applied Meteorology And Climatology* , Volumen 46, pp. 1383-1395.

Pleim, J. E., 2006. A Simple, Efficient Solution of Flux–Profile Relationships in the Atmospheric Surface Layer. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Volumen 45, pp. 341-347.

Prabha, T. & Hoogenboom, G., 2008. Evaluation of the Weather Research and Forecasting model for two frost events. *Computers And Electronics In Agriculture*, Volumen 64, p. 234–247.

Revista franco-brasileira de geografia, 2014. *Cofins*. [En línea] Available at: <https://confins.revues.org/9738?lang=pt>

Salvador, N., 2014. Estudo da Camada Limite Atmosférica em Regiões Metropolitanas Costeiras com Simulações de Brisa Marítima.

Santiago, A. M., 2009. *Simulação da Camada Limite Planetária sobre a Região Metropolitana da Grande Vitória com o uso do modelo de mesoescala WRF*, Vitória: s.n.

Santiago, A. M., 2009. *Simulação da Camada Limite Planetária sobre a Região Metropolitana da Grande Vitória com o uso do Modelo de Mesoescala WRF*, Vitória: s.n.

Santiago, A. M., 2015. *Formação e transporte de material particulado na região metropolitana da Grande Vitória/ES: Utilização e avaliação de desempenho do modelo CMAQ*, Vitória: s.n.

Schubert, W. H., Wakefield, J. S., Steiner, E. J. & Cox, S. K., 1979. Marine Stratocumulus Convection. Part I: Governing Equations and Horizontally Homogeneous Solutions. *Journal of the Atmospheric Sciences*, Volumen 36, pp. 1286-1307.

Shin, H. H. & Hong, S.-Y., 2015. Representation of the Subgrid-Scale Turbulent Transport in Convective Boundary Layers at Gray-Zone Resolutions. *Monthly Weather Review*, Volumen 143, pp. 250-271.

Shufen, S. & Yongkang, X., 2001. Implementing a New Snow Scheme in Simplified SUmple Biosphere Model. *Advances in Atmospheric Sciences*, 18(3), pp. 335-354.

Silva, M. A. V., 2006. *Meteorologia e Climatologia*. Recife: Edição digital.

Stull, R., 2000. *Meteorology for Scientist and Engineers*. 2 ed. Belmont: Brooks/Cole.

Stull, R. B., 1988. *An introduction to boundary layer meteorology*. Wisconsin: Kluwe academic publishers.

Sukoriansky, S., Galperin, B. & Perov, V., 2005. Application Of A New Spectral Theory Of Stably Stratified Turbulence To The Atmospheric Boundary Layer Over Sea Ice. *Boundary-Layer Meteorology*, pp. 231-257.

Sukoriansky, S., 2008. *Implementation of the Quasi-Normal Scale Elimination (QNSE) Model of Stably Stratified Turbulence in WRF*, s.l.: s.n.

Sunny Lim, K.-S. & Hong, S.-Y., 2010. Development of an Effective Double-Moment Cloud Microphysics Scheme with Prognostic Cloud Condensation Nuclei (CCN) for Weather and Climate Models. *Monthly Weather Review*, Volumen 138, pp. 1587-1612.

Tao, W.-K., Simpson, J. & McCumber, M., 1989. An Ice-Water Saturation Adjustment. *Monthly Weather Review*, Volumen 117, pp. 231-235.

Tardif, R. & Hacker, J. P., 2006. *Description of the WRF-1d Planetary Boundary Layer Model*, s.l.: s.n.

Tecnológico de Monterrey, 2016. *Centros Comunitarios de Aprendizaje*. [En línea] Available at: <http://www.cca.org.mx/cca/cursos/estadistica/> [Último acceso: 2016 09 17].

Thompson, G. & Eidhammer, T., 2014. A Study of Aerosol Impacts on Clouds and Precipitation Development in a Large Winter Cyclone. *Journal Of The Atmospheric Sciences*, Volumen 71, pp. 3636-3658.

Thompson, G., Field, P. R., Rasmussen, R. M. & Hall, W. D., 2008. Explicit Forecasts of Winter Precipitation Using an Improved Bulk Microphysics Scheme. Part II: Implementation of a New Snow Parameterization. *Monthly Weather Review*, Volumen 136, pp. 5095-5115.

USEPA, 2014. *Modeling Guidance for Demonstrating Attainment of Air Quality Goals for Ozone, PM2.5, and Regional Haze*, s.l.: s.n.

W. J. M. & H. P. V., 2006. *Atmospheric science - an introductory survey*. 2 ed. s.l.:s.n.

WRF users page, s.f. *WRF users page*. [En línea] Available at: [http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/wrfv3.5/phys\\_references\\_all.html](http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/wrfv3.5/phys_references_all.html) [Último acceso: 30 05 2015].

Xie, B., H. Fung, J. C., Chan, A. & Lau, A., 2012. Evaluation of nonlocal and local planetary boundary layerschemes in the WRF model. *Journal Of Geophysical Research*, Volumen 117, pp. 2-26.

Yang, Z.-L.y otros, 2011. The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah - MP): 2. Evaluation over global river basins. *Journal Of Geophysical Research*, Volumen 116, pp. 1-16.

Zhang, D. & Anthes, R. A., 1982. A High-Resolution Model of the Planetary Boundary Layer - Sensitivity test and Comparisons whith SESAME-79 Data. *Journal of Applied Meteorology* , Volumen 21, pp. 1594-1609.

Zhang, G. & McFarlane, N. A., 2013. Sensitivity of Climate Simulations to the Parameterization of Cumulus Convection in the Canadian Climate Centre General Circulation Model. *Atmosphere-Ocean*, pp. 407-446.

Zhang, H. y otros, 2014. Evaluation of a seven-year air quality simulation using the Weather Research and Forecasting (WRF)/Community Multiscale Air Quality (CMAQ) models in the eastern United States. *Science of the Total Environment*, pp. 275-285.

Zheng, Y. y otros, 2016. Improving High-Resolution Weather Forecasts Using the Weather Research and Forecasting (WRF) Model with an Updated Kain–Fritsch Scheme. *Monthly Weather Review*, Volumen 144, pp. 833-860.

Zilitinkevich, S. & Baklanov, A., 2002. Calculation Of The Height Of The Stable Boundary Layer In Practical Applications. *ResearchGate*, pp. 388-409.

Zotto, C. J., 2005. *Caracterização dos fluxos turbulentos na Camada Limite Atmosférica sobre o Atlântico Sudoeste: aplicação a dispersão de poluentes*, Rio Grande: s.n.

**APÊNDICE: Valores dos indicadores estatísticos para cada estação de monitoramento pertence a RAMQAR e o aeroporto.**

➤ **VERÃO (FEVEREIRO DE 2010)**

TABELA 9: Resumo dos resultados dos testes estatísticos para a estação Carapina (02/2010).

Variável meteorológica	Estatístico	Indicador	Modelagem							
			M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8
Velocidade do vento (10 m)	MB	$\pm 0,5$	1,38	2,87	4,30	3,63	1,57	1,53	2,88	2,76
	RMSE	$\leq 2,0$ m/s	1,85	3,48	4,64	4,37	2,41	2,29	3,77	3,69
	IOA	$\geq 0,6$	-0,17	-1,74	-2,68	-2,68	-0,83	-0,69	-2,18	-2,13
	r	-	0,75	0,49	0,49	0,53	0,02	0,11	-0,30	0,03
	Máximo (m/s)	-	8,24	10,00	11,27	12,34	8,86	8,42	8,69	9,97
	Mínimo (m/s)	-	0,11	0,11	0,49	0,04	0,06	0,15	0,14	0,25
Direção do vento (10 m)	MB	$\pm 10$	-7,10	-51,23	-62,53	-36,30	9,20	7,06	-40,08	-36,84
	MAGE	$\leq 30$ graus	29,03	80,80	83,49	66,96	72,05	71,53	72,68	77,28
	r	-	0,37	-0,20	-0,39	0,09	0,18	0,22	-0,04	-0,09
Temperatura (2 m)	MB	$\pm 0,5$ K	-1,23	-5,21	-4,04	-2,24	-4,68	-5,71	-2,11	-2,25
	MAGE	$\leq 2$ K	1,72	5,81	4,58	5,01	4,88	5,89	2,85	2,99
	IOA	$\geq 0,8$	0,89	0,64	0,73	0,72	0,67	0,61	0,82	0,83
	r	-	0,89	0,85	0,87	0,83	0,84	0,83	0,84	0,85
	Máximo (°C)	-	34,31	34,31	33,63	36,90	29,67	29,64	34,22	34,92
	Mínimo (°C)	-	21,73	21,73	14,65	10,42	13,10	11,04	13,73	14,34

\*O valor do indicador é o valor proposto pelo Emery et al. (2001).

Variável meteorológica	Estatístico	Indicador	Modelagem								
			M_9	M_10	M_11	M_12	M_13	M_14	M_15	M_16	M_17
Velocidade do vento (10 m)	MB	$\pm 0,5$	2,57	3,63	3,51	3,33	2,80	3,69	3,53	3,02	2,97
	RMSE	$\leq 2,0$ m/s	3,42	4,03	4,21	3,80	3,23	4,03	3,88	3,44	3,41
	IOA	$\geq 0,6$	-1,82	-2,14	-2,50	-1,95	-1,40	-2,09	-1,97	-1,59	-1,58
	r	-	-0,18	0,43	0,59	0,51	0,47	0,39	0,42	0,46	0,50
	Máximo (m/s)	-	9,03	10,54	11,53	10,60	9,86	9,71	9,93	9,79	9,15
	Mínimo (m/s)	-	0,11	0,19	0,30	0,32	0,28	0,28	0,29	0,09	0,36
Direção do vento (10 m)	MB	$\pm 10$	-41,92	-33,79	-52,71	-44,40	-51,55	-36,05	-36,72	-39,61	-39,68
	MAGE	$\leq 30$ graus	72,42	71,31	84,41	74,79	77,33	68,57	69,49	72,72	72,96
	r	-	0,01	-0,08	-0,21	-0,16	-0,01	-0,21	-0,18	-0,20	-0,16
Temperatura (2 m)	MB	$\pm 0,5$ K	-2,72	-3,92	-4,34	-4,84	-6,10	-3,30	-3,78	-4,00	-4,69
	MAGE	$\leq 2$ K	3,47	4,52	4,97	5,47	6,82	3,97	4,45	4,67	5,37
	IOA	$\geq 0,8$	0,77	0,72	0,69	0,65	0,60	0,76	0,71	0,72	0,67
	r	-	0,83	0,85	0,85	0,84	0,84	0,84	0,83	0,86	0,85
	Máximo (°C)	-	34,16	33,52	34,10	33,46	39,26	33,42	33,46	33,95	34,11
	Mínimo (°C)	-	11,61	12,86	9,74	8,97	7,59	14,54	12,41	14,26	11,69

\*O valor do indicador é o valor proposto pelo Emery et al. (2001).



TABELA 10: Resumo dos resultados dos testes estatísticos para a estação Enseada do Suá (02/2010).

Variável meteorológica	Estatístico	Indicador	Modelagem							
			M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8
Velocidade do vento (10 m)	MB	$\pm 0,5$	0,41	1,45	1,67	3,04	0,83	0,78	0,94	0,62
	RMSE	$\leq 2,0$ m/s	1,55	2,33	3,09	3,76	2,55	2,43	2,31	1,86
	IOA	$\geq 0,6$	0,55	0,14	-0,45	-0,77	-0,13	-0,03	0,09	0,38
	r	-	0,57	0,55	0,55	0,41	-0,13	-0,09	-0,01	0,42
	Máximo (m/s)	-	7,74	9,67	11,98	12,93	9,62	8,02	7,57	9,53
	Mínimo (m/s)	-	0,34	0,03	0,03	0,48	0,25	0,18	0,17	0,06
Direção do vento (10 m)	MB	$\pm 10$	-19,89	-41,32	-19,39	-39,60	-9,03	-10,25	-23,38	-22,02
	MAGE	$\leq 30$ graus	48,48	87,90	80,07	79,35	67,76	69,56	86,00	86,45
	r	-	0,35	-0,12	-0,17	0,11	0,22	0,19	-0,01	-0,02

Variável meteorológica	Estatístico	Indicador	Modelagem								
			M_9	M_10	M_11	M_12	M_13	M_14	M_15	M_16	M_17
Velocidade do vento (10 m)	MB	$\pm 0,5$	0,73	1,87	1,89	1,72	1,29	2,14	1,97	2,24	2,13
	RMSE	$\leq 2,0$ m/s	2,05	2,66	2,84	2,59	2,25	2,78	2,59	2,80	2,73
	IOA	$\geq 0,6$	0,25	-0,05	-0,19	-0,01	0,18	-0,10	0,02	-0,09	-0,06
	r	-	0,15	0,49	0,61	0,51	0,51	0,47	0,51	0,36	0,40
	Máximo (m/s)	-	6,95	9,43	11,64	10,23	10,53	10,27	9,15	8,88	9,84
	Mínimo (m/s)	-	0,15	0,11	0,29	0,08	0,12	0,49	0,12	0,25	0,12
Direção do vento (10 m)	MB	$\pm 10$	-22,47	-36,64	-33,47	-36,66	-36,25	-39,06	-38,25	-44,59	-44,69
	MAGE	$\leq 30$ graus	84,63	87,11	88,07	85,22	84,31	86,42	86,14	85,24	85,64
	r	-	0,05	-0,09	-0,08	-0,14	-0,05	-0,09	-0,10	-0,05	-0,13

\*O valor do indicador é o valor proposto pelo Emery et al. (2001).

TABELA 11: Resumo dos resultados dos testes estatísticos para a estação Ibes (02/2010).

Variável meteorológica	Estatístico	Indicador	Modelagem							
			M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8
Velocidade do vento (10 m)	MB	$\pm 0,5$	0,43	1,46	2,14	2,64	0,33	0,27	-0,17	0,36
	RMSE	$\leq 2,0$ m/s	1,20	2,15	3,41	3,38	1,80	1,79	1,44	1,71
	IOA	$\geq 0,6$	0,72	0,26	-0,69	-0,54	0,36	0,36	0,55	0,43
	r	-	0,69	0,52	0,63	0,42	0,08	0,06	0,43	0,57
	Máximo (m/s)	-	7,20	9,44	12,48	12,19	7,97	7,63	5,88	8,64
	Mínimo (m/s)	-	0,26	0,28	0,11	0,41	0,14	0,04	0,02	0,02
Direção do vento (10 m)	MB	$\pm 10$	-2,31	-22,49	-13,34	-20,15	6,26	1,59	-4,25	-3,38
	MAGE	$\leq 30$ graus	32,34	64,76	64,75	57,02	69,19	66,32	81,71	83,76
	r	-	0,34	-0,12	-0,13	0,24	0,22	0,26	-0,22	-0,13

Variável meteorológica	Estatístico	Indicador	Modelagem								
			M_9	M_10	M_11	M_12	M_13	M_14	M_15	M_16	M_17
Velocidade do vento (10 m)	MB	$\pm 0,5$	-0,44	1,36	2,13	1,10	1,02	1,55	1,33	2,36	2,27
	RMSE	$\leq 2,0$ m/s	1,44	2,07	3,05	1,93	2,01	2,10	1,95	2,89	2,75
	IOA	$\geq 0,6$	0,52	0,30	-0,35	0,36	0,30	0,30	0,37	-0,17	-0,08
	r	-	0,46	0,56	0,64	0,59	0,57	0,56	0,60	0,30	0,40
	Máximo (m/s)	-	5,93	8,83	12,31	8,60	9,77	8,60	8,65	10,16	10,26
	Mínimo (m/s)	-	0,02	0,26	0,13	0,07	0,15	0,16	0,19	0,38	1,11
Direção do vento (10 m)	MB	$\pm 10$	-12,33	-22,54	-17,07	-20,30	-15,45	-21,96	-19,48	-28,47	-28,24
	MAGE	$\leq 30$ graus	84,59	65,33	69,97	66,39	66,23	65,12	64,75	65,75	65,96
	r	-	-0,22	-0,09	-0,16	-0,14	0,01	-0,19	-0,18	0,00	-0,07

\*O valor do indicador é o valor proposto pelo Emery et al. (2001).

TABELA 12: Resumo dos resultados dos testes estatísticos para a estação Cariacica (02/2010).

Variável meteorológica	Estatístico	Indicador	Modelagem							
			M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8
Velocidade do vento (10 m)	MB	$\pm 0,5$	1,14	1,33	2,07	2,00	0,86	0,86	0,16	0,80
	RMSE	$\leq 2,0$ m/s	1,58	2,14	3,55	2,79	0,24	1,66	1,41	2,02
	IOA	$\geq 0,6$	0,40	-0,64	-1,49	-0,55	0,39	0,28	0,37	-0,08
	r	-	0,70	0,45	0,51	0,39	0,07	0,20	0,16	0,21
	Máximo (m/s)	-	6,46	9,79	11,90	9,60	7,60	10,53	6,17	9,21
	Mínimo (m/s)	-	0,31	0,13	0,09	0,22	0,15	0,23	0,01	0,03
Temperatura (2 m)	MB	$\pm 0,5$ K	-1,12	-2,59	-4,41	-1,90	-3,21	-3,44	-2,90	-3,34
	MAGE	$\leq 2$ K	1,51	3,17	4,94	3,17	3,81	3,62	3,22	3,69
	IOA	$\geq 0,8$	0,89	0,84	0,73	0,86	0,75	0,75	0,82	0,80
	r	-	0,95	0,86	0,87	0,88	0,85	0,85	0,87	0,88
	Máximo (°C)	-	31,56	31,56	35,04	37,95	30,88	31,08	34,48	35,05
	Mínimo (°C)	-	24,23	24,23	14,10	18,80	19,70	19,33	19,96	17,97

\*O valor do indicador é o valor proposto pelo Emery et al. (2001).

Variável meteorológica	Estatístico	Indicador	Modelagem								
			M_9	M_10	M_11	M_12	M_13	M_14	M_15	M_16	M_17
Velocidade do vento (10 m)	MB	$\pm 0,5$	0,08	1,41	2,43	1,28	1,30	1,38	1,20	1,51	1,44
	RMSE	$\leq 2,0$ m/s	1,40	2,28	3,63	2,18	2,38	2,17	2,04	2,19	2,15
	IOA	$\geq 0,6$	0,37	-0,18	-1,44	-0,11	-0,31	-0,07	0,00	-0,06	-0,04
	r	-	0,15	0,47	0,51	0,49	0,45	0,49	0,50	0,37	0,35
	Máximo (m/s)	-	6,33	8,83	12,67	9,10	9,65	8,22	8,56	9,18	8,20
	Mínimo (m/s)	-	0,05	0,10	0,14	0,17	0,14	0,13	0,10	0,17	0,18
Temperatura (2 m)	MB	$\pm 0,5$ K	-3,17	-3,19	-3,78	-3,45	-4,49	-2,31	-2,66	-1,67	-1,88
	MAGE	$\leq 2$ K	3,47	3,75	4,43	4,04	5,47	2,96	3,29	2,41	2,61
	IOA	$\geq 0,8$	0,80	0,80	0,76	0,78	0,71	0,85	0,83	0,89	0,87
	r	-	0,87	0,86	0,87	0,86	0,87	0,87	0,86	0,87	0,86
	Máximo (°C)	-	34,52	34,62	35,38	34,78	39,27	35,04	34,89	34,87	34,84
	Mínimo (°C)	-	19,30	15,34	14,63	14,98	12,36	17,81	17,15	19,44	18,92

\*O valor do indicador é o valor proposto pelo Emery et al. (2001).

TABELA 13: Resumo dos resultados dos testes estatísticos para a estação aeroporto (02/2010).

Variável meteorológica	Estatístico	Indicador	Modelagem							
			M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8
Velocidade do vento (10 m)	MB	$\pm 0,5$	-1,05	1,15	2,12	1,97	-0,77	-0,76	0,54	0,60
	RMSE	$\leq 2,0$ m/s	2,63	3,30	3,55	3,35	3,74	3,76	3,93	3,80
	IOA	$\geq 0,6$	0,46	0,28	0,22	0,30	-0,06	-0,07	-0,07	0,00
	r	-	0,71	0,38	0,51	0,58	0,00	-0,01	-0,28	-0,05
	Máximo (m/s)	-	8,64	11,20	11,62	12,42	8,17	8,98	7,73	9,06
	Mínimo (m/s)	-	0,08	0,22	1,55	0,84	0,18	0,15	0,24	0,19
Direção do vento (10 m)	MB	$\pm 10$	-20,95	-60,19	-59,81	-48,71	-8,27	-10,75	-48,29	-51,15
	MAGE	$\leq 30$ graus	41,59	84,14	81,62	70,72	73,07	75,48	77,91	77,32
	r	-	0,22	0,05	-0,05	0,06	0,09	0,08	-0,02	-0,02
Temperatura (2 m)	MB	$\pm 0,5$ K	-1,89	-5,33	-4,95	-1,42	-5,71	-6,60	-3,67	-3,64
	MAGE	$\leq 2$ K	2,08	6,04	5,58	4,39	5,87	6,76	4,56	4,57
	IOA	$\geq 0,8$	0,83	0,53	0,58	0,88	0,52	0,47	0,65	0,65
	r	-	0,88	0,78	0,81	0,81	0,80	0,79	0,81	0,81
	Máximo (°C)	-	34,86	34,86	34,38	37,15	29,61	29,67	34,44	35,30
	Mínimo (°C)	-	16,00	16,00	13,67	12,28	13,39	11,24	13,09	12,53

\*O valor do indicador é o valor proposto pelo Emery et al. (2001).

Variável meteorológica	Estatístico	Indicador	Modelagem								
			M_9	M_10	M_11	M_12	M_13	M_14	M_15	M_16	M_17
Velocidade do vento (10 m)	MB	$\pm 0,5$	0,26	1,38	1,49	1,11	0,81	1,64	1,50	1,28	1,26
	RMSE	$\leq 2,0$ m/s	3,81	3,32	3,05	3,10	3,06	3,43	3,30	3,41	3,45
	IOA	$\geq 0,6$	-0,02	0,28	0,36	0,36	0,36	0,24	0,29	0,24	0,21
	r	-	-0,18	0,42	0,57	0,49	0,45	0,40	0,45	0,30	0,28
	Máximo (m/s)	-	8,57	10,66	12,57	10,66	10,36	10,19	9,61	9,31	9,65
	Mínimo (m/s)	-	0,27	0,67	0,40	0,12	0,19	0,40	0,42	0,69	0,51
Direção do vento (10 m)	MB	$\pm 10$	-49,39	-58,70	-60,88	-57,38	-59,00	-56,87	-57,15	-51,36	-51,68
	MAGE	$\leq 30$ graus	79,30	84,20	86,15	83,66	83,77	79,29	80,91	76,07	77,85
	r	-	-0,04	-0,06	0,01	0,00	0,05	-0,06	-0,05	0,01	-0,01
Temperatura (2 m)	MB	$\pm 0,5$ K	-3,87	-4,94	-5,56	-5,60	-6,56	-4,13	-4,28	-4,20	-4,44
	MAGE	$\leq 2$ K	4,75	5,65	6,30	6,32	7,48	4,84	5,01	5,04	5,28
	IOA	$\geq 0,8$	0,81	0,57	0,76	0,52	0,48	0,62	0,60	0,61	0,58
	r	-	0,81	0,81	0,80	0,80	0,80	0,81	0,79	0,80	0,79
	Máximo (°C)	-	34,52	33,70	34,36	33,72	36,90	33,60	33,78	34,12	34,34
	Mínimo (°C)	-	11,67	12,42	10,52	10,46	6,82	13,92	12,59	14,07	11,80

\*O valor do indicador é o valor proposto pelo Emery et al. (2001).

➤ **INVERNO (JULHO DE 2010)**

TABELA 14: Resumo dos resultados dos testes estatísticos para a estação Carapina (07/2010).

Variável meteorológica	Estatístico	Indicador	Modelagem							
			M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8
Velocidade do vento (10 m)	MB	$\pm 0,5$	1,79	1,58	2,01	10,34	1,94	1,61	1,98	2,18
	RMSE	$\leq 2,0$ m/s	2,12	2,01	2,39	10,47	2,24	2,03	2,39	2,70
	IOA	$\geq 0,6$	-0,94	-0,89	-1,26	-9,11	-1,04	-0,92	-1,27	-1,70
	r	-	0,47	0,49	0,54	0,35	0,53	0,57	0,43	0,52
	Máximo (m/s)	-	7,68	7,70	8,82	19,83	7,79	7,46	7,72	8,94
	Mínimo (m/s)	-	0,07	0,04	0,16	8,45	0,30	0,05	0,01	0,01
Direção do vento (10 m)	MB	$\pm 10$	-3,66	-3,47	-7,85	-1,21	-5,73	-5,46	-1,05	-2,52
	MAGE	$\leq 30$ graus	43,00	43,02	41,81	95,44	40,48	40,47	42,44	41,02
	r	-	0,42	0,41	0,51	0,09	0,48	0,48	0,37	0,35
Temperatura (2 m)	MB	$\pm 0,5$ K	-0,20	-0,39	-0,36	14,56	-0,15	-0,39	0,04	0,01
	MAGE	$\leq 2$ K	1,39	1,41	1,37	14,56	1,21	1,21	1,27	1,42
	IOA	$\geq 0,8$	0,90	0,91	0,91	0,28	0,93	0,93	0,92	0,91
	r	-	0,77	0,77	0,78	0,38	0,83	0,82	0,81	0,78
	Máximo (°C)	-	27,86	27,90	28,06	42,25	28,13	27,88	28,22	28,47
	Mínimo (°C)	-	15,82	15,46	15,14	29,81	15,85	14,70	15,57	15,65

\*O valor do indicador é o valor proposto pelo Emery et al. (2001).

Variável meteorológica	Estatístico	Indicador	Modelagem								
			M_9	M_10	M_11	M_12	M_13	M_14	M_15	M_16	M_17
Velocidade do vento (10 m)	MB	$\pm 0,5$	1,82	1,77	1,88	1,61	2,15	1,77	1,72	1,72	1,67
	RMSE	$\leq 2,0$ m/s	2,29	2,09	2,31	2,00	2,62	2,13	2,11	2,04	2,02
	IOA	$\geq 0,6$	-1,23	-0,92	-1,22	-0,87	-1,57	-0,97	-0,97	-0,85	-0,84
	r	-	0,48	0,47	0,54	0,50	0,25	0,48	0,49	0,52	0,52
	Máximo (m/s)	-	7,54	7,56	8,99	7,83	10,21	7,36	7,46	7,07	7,24
	Mínimo (m/s)	-	0,02	0,13	0,20	0,13	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03
Direção do vento (10 m)	MB	$\pm 10$	-1,12	-4,50	-6,95	-2,21	1,19	-0,77	-0,32	-4,52	-1,54
	MAGE	$\leq 30$ graus	41,97	40,14	41,46	39,97	59,16	40,16	40,12	41,42	40,79
	r	-	0,37	0,52	0,53	0,52	0,24	0,45	0,45	0,47	0,48
Temperatura (2 m)	MB	$\pm 0,5$ K	-0,13	-0,31	-0,58	-0,52	-1,67	-0,23	-0,38	-0,14	-0,31
	MAGE	$\leq 2$ K	1,26	1,19	1,21	1,23	2,18	1,24	1,26	1,21	1,21
	IOA	$\geq 0,8$	0,93	0,93	0,93	0,93	0,76	0,92	0,92	0,93	0,93
	r	-	0,81	0,82	0,81	0,82	0,61	0,83	0,82	0,83	0,83
	Máximo (°C)	-	28,22	27,80	27,66	27,64	27,85	27,68	27,74	28,26	28,28
	Mínimo (°C)	-	14,79	15,47	14,75	15,14	14,80	15,50	15,07	16,00	15,35

\*O valor do indicador é o valor proposto pelo Emery et al. (2001).



TABELA 15: Resumo dos resultados dos testes estatísticos para a estação Enseada do Suá (07/2010).

Variável meteorológica	Estatístico	Indicador	Modelagem							
			M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8
Velocidade do vento (10 m)	MB	$\pm 0,5$	0,78	0,55	0,85	10,23	0,88	0,63	0,89	0,98
	RMSE	$\leq 2,0$ m/s	1,52	1,46	1,69	10,34	1,52	1,41	1,65	1,85
	IOA	$\geq 0,6$	0,10	0,10	-0,09	-7,92	0,13	0,18	-0,01	-0,24
	r	-	0,37	0,41	0,46	0,33	0,41	0,46	0,32	0,44
	Máximo (m/s)	-	7,38	7,88	8,71	18,21	6,97	7,04	7,20	8,58
	Mínimo (m/s)	-	0,12	0,07	0,14	9,41	0,22	0,15	0,06	0,08
Direção do vento (10 m)	MB	$\pm 10$	7,97	4,77	6,47	-14,89	6,17	3,45	1,10	0,41
	MAGE	$\leq 30$ graus	56,89	56,02	59,52	89,94	56,35	55,75	54,95	53,21
	r	-	0,45	0,45	0,42	0,25	0,45	0,46	0,36	0,44

Variável meteorológica	Estatístico	Indicador	Modelagem								
			M_9	M_10	M_11	M_12	M_13	M_14	M_15	M_16	M_17
Velocidade do vento (10 m)	MB	$\pm 0,5$	0,64	0,68	0,71	0,44	1,00	0,66	0,62	0,82	0,78
	RMSE	$\leq 2,0$ m/s	1,58	1,46	1,63	1,40	1,95	1,49	1,45	1,46	1,44
	IOA	$\geq 0,6$	-0,02	0,14	-0,06	0,13	-0,37	0,10	0,13	0,18	0,18
	r	-	0,38	0,36	0,47	0,43	0,20	0,38	0,40	0,42	0,43
	Máximo (m/s)	-	7,43	7,26	8,42	7,17	8,70	7,16	7,24	6,99	7,69
	Mínimo (m/s)	-	0,00	0,14	0,09	0,02	0,16	0,01	0,05	0,08	0,12
Direção do vento (10 m)	MB	$\pm 10$	2,56	8,76	3,79	5,64	-0,53	4,86	5,38	-2,65	-2,95
	MAGE	$\leq 30$ graus	54,71	60,50	56,73	56,64	68,41	55,62	57,09	55,01	53,71
	r	-	0,35	0,40	0,42	0,43	0,20	0,42	0,41	0,43	0,43

\*O valor do indicador é o valor proposto pelo Emery et al. (2001).

TABELA 16: Resumo dos resultados dos testes estatísticos para a estação Ibes (07/2010).

Variável meteorológica	Estatístico	Indicador	Modelagem							
			M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8
Velocidade do vento (10 m)	MB	$\pm 0,5$	0,46	0,37	1,04	9,47	0,57	0,43	0,55	1,29
	RMSE	$\leq 2,0$ m/s	1,20	1,17	1,83	9,60	1,30	1,25	1,39	2,09
	IOA	$\geq 0,6$	0,28	0,30	-0,29	-7,37	0,20	0,22	0,09	-0,52
	r	-	0,60	0,63	0,63	0,42	0,61	0,61	0,50	0,57
	Máximo (m/s)	-	7,19	7,13	9,28	17,29	6,93	6,82	7,16	9,23
	Mínimo (m/s)	-	0,02	0,02	0,03	7,17	0,03	0,05	0,02	0,00
Direção do vento (10 m)	MB	$\pm 10$	5,81	14,42	17,57	-20,36	-4,22	0,45	3,38	7,72
	MAGE	$\leq 30$ graus	56,83	59,57	62,20	93,04	58,03	59,77	54,95	57,78
	r	-	0,37	0,31	0,27	0,02	0,33	0,38	0,39	0,35

Variável meteorológica	Estatístico	Indicador	Modelagem								
			M_9	M_10	M_11	M_12	M_13	M_14	M_15	M_16	M_17
Velocidade do vento (10 m)	MB	$\pm 0,5$	0,44	0,23	0,84	0,14	0,87	0,32	0,24	0,79	0,73
	RMSE	$\leq 2,0$ m/s	1,31	1,13	1,73	1,12	1,73	1,14	1,12	1,41	1,37
	IOA	$\geq 0,6$	0,15	0,28	-0,25	0,27	-0,23	0,31	0,31	0,15	0,17
	r	-	0,54	0,61	0,63	0,62	0,24	0,64	0,64	0,62	0,63
	Máximo (m/s)	-	7,17	6,69	9,11	6,80	8,87	7,01	6,96	7,10	7,06
	Mínimo (m/s)	-	0,00	0,07	0,12	0,02	0,07	0,00	0,02	0,10	0,07
Direção do vento (10 m)	MB	$\pm 10$	8,63	1,66	13,99	12,63	6,67	6,31	6,38	0,65	2,92
	MAGE	$\leq 30$ graus	56,68	61,46	61,09	61,96	69,26	58,81	59,78	54,56	54,58
	r	-	0,36	0,22	0,25	0,23	0,09	0,29	0,30	0,42	0,41

\*O valor do indicador é o valor proposto pelo Emery et al. (2001).

TABELA 17: Resumo dos resultados dos testes estatísticos para a estação Cariacica (07/2010).

Variável meteorológica	Estatístico	Indicador	Modelagem							
			M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8
Velocidade do vento (10 m)	MB	$\pm 0,5$	0,97	0,90	1,55	9,29	1,14	1,01	1,06	1,95
	RMSE	$\leq 2,0$ m/s	<u>1,42</u>	<u>1,37</u>	2,14	9,36	<u>1,62</u>	<u>1,52</u>	<u>1,67</u>	2,58
	IOA	$\geq 0,6$	0,08	0,12	-0,64	-7,33	-0,10	-0,03	-0,21	-1,09
	r	-	0,53	0,54	0,57	0,29	0,52	0,53	0,40	0,49
	Máximo (m/s)	-	6,37	6,09	8,23	15,55	6,37	6,14	6,26	8,26
	Mínimo (m/s)	-	0,16	0,05	0,14	8,10	0,01	0,11	0,00	0,02
Temperatura (2 m)	MB	$\pm 0,5$ K	<u>0,35</u>	<u>0,31</u>	<u>0,22</u>	18,01	<u>0,32</u>	<u>0,22</u>	<u>0,46</u>	0,54
	MAGE	$\leq 2$ K	<u>1,55</u>	<u>1,54</u>	<u>1,31</u>	18,01	<u>1,32</u>	<u>1,25</u>	<u>1,39</u>	<u>1,47</u>
	IOA	$\geq 0,8$	<u>0,86</u>	<u>0,86</u>	<u>0,91</u>	0,23	0,90	<u>0,91</u>	<u>0,89</u>	<u>0,89</u>
	r	-	0,82	0,82	0,85	0,42	0,89	0,89	0,89	0,84
	Máximo (°C)	-	29,55	29,54	30,10	47,06	29,80	29,75	29,66	29,98
	Mínimo (°C)	-	17,70	17,38	16,86	33,39	17,40	17,53	17,90	18,03

\*O valor do indicador é o valor proposto pelo Emery et al. (2001).

Variável meteorológica	Estatístico	Índice	Modelagem								
			M_9	M_10	M_11	M_12	M_13	M_14	M_15	M_16	M_17
Velocidade do vento (10 m)	MB	$\pm 0,5$	1,00	0,71	1,44	0,63	1,32	0,86	0,77	1,28	1,21
	RMSE	$\leq 2,0$ m/s	1,62	1,33	2,16	1,29	1,96	1,38	1,33	1,68	1,63
	IOA	$\geq 0,6$	-0,17	0,09	-0,74	0,12	-0,51	0,10	0,12	-0,13	-0,09
	r	-	0,41	0,50	0,51	0,50	0,33	0,53	0,52	0,53	0,53
	Máximo (m/s)	-	6,34	6,37	9,44	6,41	7,96	6,15	6,05	6,37	6,28
	Mínimo (m/s)	-	0,01	0,06	0,09	0,04	0,12	0,00	0,00	0,11	0,09
Temperatura (2 m)	MB	$\pm 0,5$ K	0,42	0,14	0,12	0,14	-1,84	0,21	0,17	0,46	0,42
	MAGE	$\leq 2$ K	1,35	1,27	1,12	1,26	2,19	1,32	1,29	1,44	1,40
	IOA	$\geq 0,8$	0,90	0,90	0,93	0,91	0,78	0,90	0,90	0,88	0,89
	r	-	0,89	0,89	0,90	0,89	0,70	0,88	0,88	0,88	0,88
	Máximo (°C)	-	29,67	29,37	29,56	29,41	30,05	29,39	29,43	29,75	29,78
	Mínimo (°C)	-	17,53	17,44	17,05	17,37	15,63	17,34	17,06	17,98	17,75

\*O valor do indicador é o valor proposto pelo Emery et al. (2001).

TABELA 18: Resumo dos resultados dos testes estatísticos para a estação aeroporto (07/2010).

Variável meteorológica	Estatístico	Indicador	Modelagem							
			M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8
Velocidade do vento (10 m)	MB	$\pm 0,5$	0,48	0,29	0,75	8,90	0,60	0,42	0,63	0,88
	RMSE	$\leq 2,0$ m/s	2,01	1,97	2,01	9,12	1,97	1,88	2,01	2,05
	IOA	$\geq 0,6$	0,06	0,06	0,11	-5,55	0,12	0,17	0,09	0,10
	r	-	0,36	0,40	0,47	0,43	0,43	0,47	0,44	0,52
	Máximo (m/s)	-	8,19	7,24	8,60	18,21	7,71	7,79	7,66	9,79
	Mínimo (m/s)	-	0,09	0,03	0,34	8,65	0,13	0,05	0,08	0,13
Direção do vento (10 m)	MB	$\pm 10$	-26,26	-28,07	-29,90	29,10	-28,94	-28,44	-22,11	-25,85
	MAGE	$\leq 30$ graus	58,06	58,67	57,27	88,65	56,63	58,23	54,84	55,50
	r	-	0,11	0,08	0,09	0,18	0,08	0,08	0,09	0,11
Temperatura (2 m)	MB	$\pm 0,5$ K	-0,89	-1,04	-1,15	13,20	-0,84	-1,00	-0,63	-0,73
	MAGE	$\leq 2$ K	1,48	1,58	1,64	13,20	1,38	1,47	1,31	1,48
	IOA	$\geq 0,8$	0,89	0,88	0,88	0,28	0,90	0,90	0,91	0,89
	r	-	0,84	0,84	0,85	0,41	0,87	0,86	0,87	0,83
	Máximo (°C)	-	28,18	28,22	28,32	42,62	28,19	28,18	28,12	28,10
	Mínimo (°C)	-	15,67	15,42	14,83	29,51	16,26	15,73	15,50	15,56

\*O valor do indicador é o valor proposto pelo Emery et al. (2001).

Variável meteorológica	Estatístico	Indicador	Modelagem								
			M_9	M_10	M_11	M_12	M_13	M_14	M_15	M_16	M_17
Velocidade do vento (10 m)	MB	$\pm 0,5$	0,48	0,43	0,60	0,27	0,73	0,48	0,41	0,44	0,41
	RMSE	$\leq 2,0$ m/s	1,93	1,92	1,97	1,91	2,35	1,94	1,91	1,92	1,92
	IOA	$\geq 0,6$	0,13	0,13	0,12	0,11	-0,21	0,12	0,13	0,13	0,12
	r	-	0,47	0,43	0,47	0,43	0,25	0,43	0,44	0,43	0,42
	Máximo (m/s)	-	7,85	7,33	9,11	7,43	8,49	7,32	7,35	7,18	7,33
	Mínimo (m/s)	-	0,00	0,12	0,21	0,04	0,07	0,01	0,06	0,04	0,08
Direção do vento (10 m)	MB	$\pm 10$	-22,88	-26,55	-31,73	-26,02	-16,46	-26,23	-27,18	-23,26	-24,21
	MAGE	$\leq 30$ graus	54,90	56,50	59,50	56,52	67,10	54,46	54,86	57,57	56,60
	r	-	0,08	0,09	0,07	0,10	0,11	0,11	0,12	0,11	0,12
Temperatura (2 m)	MB	$\pm 0,5$ K	-0,78	-1,03	-1,32	-1,20	-2,32	-0,93	-1,03	-0,81	-0,93
	MAGE	$\leq 2$ K	1,39	1,45	1,65	1,57	2,62	1,40	1,47	1,38	1,43
	IOA	$\geq 0,8$	0,90	0,89	0,89	0,88	0,71	0,89	0,89	0,90	0,90
	r	-	0,86	0,87	0,87	0,86	0,66	0,86	0,86	0,86	0,86
	Máximo (°C)	-	28,21	28,05	28,06	28,14	27,96	28,00	28,03	28,39	28,37
	Mínimo (°C)	-	15,30	15,71	15,20	15,50	13,60	15,75	16,01	15,74	15,30

\*O valor do indicador é o valor proposto pelo Emery et al. (2001).